

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное  
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»

---

На правах рукописи



**Зарубина Ольга Александровна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ СИЛУМИНОВ ПО  
КАНАЛАМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТЛИВКИ ОКСИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., доцент  
Коротченко А.Ю.

Москва, 2021 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Влияние оксидных включений на механические свойства отливок из алюминиевых сплавов.....	13
1.2 Анализ существующих представлений о процессе окисления расплава.....	23
1.3 Особенности конструкции нижних и боковых литниковых систем для алюминиевых сплавов .....	28
1.4 Применение верхних литниковых систем для отливок из алюминиевых сплавов при литье в кокиль .....	31
1.5 Реологические свойства расплава .....	34
1.6 Способы оценки содержания в отливках оксидных включений.....	42
2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОТЛИВКАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЛАВА ..	49
2.1 Критериальная оценка содержания в отливках оксидов путем численного моделирования процесса .....	50
2.1.1 Сущность критерия.....	50
2.1.2 Результаты экспериментов.....	53
2.2 Оценка вероятного объема оксида алюминия, образующегося в формообразующей полости кокиля.....	56
2.3 Определение реологических характеристик расплава в интервале кристаллизации .....	59
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ ОТЛИВКИ ОКСИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ .....	69

3.1	ЗАВИСИМОСТЬ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ОТЛИВКИ ОКСИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЛИВКИ РАСПЛАВА В ФОРМУ .....	69
3.2	ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОТЛИВКИ В ФОРМЕ НА ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ $K_{OF}$ .....	74
3.3	ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ТЕЛЕ ОТЛИВКИ .....	78
3.4	ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСПЛАВА ПРИ ВЕРХНЕЙ ЗАЛИВКЕ ФОРМЫ .....	89
4.	ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВО .....	97
4.1	АНАЛИЗ ЗАВОДСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «ПОРШЕНЬ» .....	97
4.1.1	Влияние параметров заливки кокиля на загрязненность отливки оксидными включениями .....	98
4.1.2	Исследование работы дополнительных элементов литейной формы .....	106
4.2	РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «КОРПУС 3» .....	113
4.3	РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «ЛУЧ» .....	125
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	134
5.	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	136
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	139
	ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	151
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	152
	ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	153

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из главных направлений развития отечественного литейного производства остаются:

- повышение производительности труда. Отставание по этому показателю от некоторых ведущих стран Мира в 1.5...6.5 раз и, как следует из материалов съездов литейщиков России [1, 2], за последние годы в среднем по стране он составлял не более 13,7 тонны в год на одного работающего в литейном производстве;

- снижение материальных и энергетических затрат [3, 4, 5, 6];

- повышение служебных характеристик отливок [7, 8, 9];

- сокращение сроков и затрат на освоение технологии производства литых изделий;

- уменьшение вредного воздействия на окружающую среду, в том числе, и путем снижения брака отливок.

Достижение таких результатов без повышения точности расчета основных параметров технологического процесса, то есть без высокоэффективной технологической подготовки производства, невозможно.

Несмотря на то, что в последние годы быстрыми темпами развиваются новые технологии, к которым относятся тиксо- и реолитье, гибридные технологии изготовления литых заготовок и деталей, дальнейшее изучение традиционных способов литья не теряет своей актуальности. Так объем выпуска отливок литьем в кокиль до настоящего времени имеет значительную долю и в последние годы она составляла ~4,2...5,0% [10] от общего объема производства отливок в России (по разным оценкам за последние пять лет 3,8...4,3 млн. тонн в год [11, 10]). Его доля в производстве фасонных отливок из цветных металлов и сплавов значительно выше, а из алюминиевых составляет ~9% [10]. При этом, суммарный объем производства отливок из алюминиевых сплавов в России по экспертным оценкам составляет от ~200 (отливок и слитков 440) [2] до 600 тыс. тонн в год, а

«...главные тренды мирового литейного производства — переход от отливок из стали к высокопрочному чугуну и далее к алюминию» [12].

Широкое использование литья в кокиль в промышленности, прежде всего, обусловлено такими его преимуществами, как малооперационность, относительно высокая размерная точность и качество поверхности отливок. Этот процесс обеспечивает более широкие, чем при литье в песчаные формы, возможности по управлению макро и микроструктурой материала отливок, увеличение производительности процесса. Стоит заметить, что по такому показателю, как выпуск продукции с единицы производственной площади процесс изготовления отливок литьем в кокиль является одним из лидеров при любой серийности их производства.

Наряду с указанными преимуществами данный процесс по сравнению, например, с литьем под давлением имеет существенно более низкие показатели по коэффициенту использования металла ( $K_{им} = m_{дет}/(m_{отл} + m_{лс}) \cdot 100, \%$ ), а также точности массы ( $K_{тм} = m_{дет}/m_{отл} \cdot 100, \%$ ). Его недостатки проявляются тем существеннее, чем иррациональнее выполнена литниковая система и определены другие технологические параметры, отвечающие за качество отливок.

Вместе с тем, непростой задачей при литье в кокиль является получение отливок из алюминиевых сплавов с высокими прочностными характеристиками. Во многих случаях даже применение современных способов рафинирования и модифицирования расплава перед заливкой [13, 14], его внутриформенной очистки путем использования современных керамических фильтров различных типов [15, 16, 17] или упрочняющей термообработки готовых отливок [18, 19] не приводит к желаемому результату. Одна из основных причин этого обусловлена склонностью данных сплавов к окислению, в том числе и на этапе заполнения каналов литниковой системы и формообразующей полости. В некоторых источниках эти процессы в форме называют вторичным окислением расплава, а образующиеся оксиды «молодыми».

Известно, что и «молодые» оксиды в виде плен и их фрагментов оказывают весьма существенное негативное влияние на процесс питания затвердевающей отливки и ее механические свойства [19, 20]. Они затрудняют или полностью исключают фильтрацию расплава в зоны кристаллизирующейся отливки, где возникает его дефицит. Причем, с увеличением температурного интервала кристаллизации сплава, влияние естественных загрязнений на процесс питания возрастает [21]. Следствием этого, является повышение пористости, снижение механических свойств (прочности на 10...17%, а относительного удлинения в 1,5...2 раза [22, 23, 24, 25, 21, 19]), других служебных характеристик отливок и технологических свойств литейных алюминиевых сплавов, затрудняющих, например, получение тонкостенных отливок. Последнее обусловлено повышением вязкости и снижением жидкотекучести с увеличением содержания в расплаве оксидных включений [26, 27]. В работе [28] отмечается значительное снижение механических свойств отливок при достижении пористости, соответствующей 4 и 5 баллам по пятибальной шкале пористости ВИАМ (ГОСТ 1583 – 93 [29]).

Один из современных, но дорогостоящих способов решения этой проблемы приведен в работе [30], где, для повышения плотности и прочности отливок из алюминиевых сплавов предлагается горячее изостатическое прессование, способствующее повышению их плотности, с последующей традиционной термообработкой. Как было отмечено выше, недостаток такого способа обеспечения высоких служебных характеристик заключается в существенном повышении себестоимости изделий.

Другой способ решения этой задачи рассмотрен в работе [31], в которой показана эффективность использования низкотемпературного литья, в том числе и при литье в кокиль, нагруженных деталей и заготовок. При этом обращается внимание на то, что «... низкотемпературное литье алюминиевых сплавов является эффективным фактором ресурсосбережения и альтернативой экологически вредным операциям их химического модифицирования».

Приведенные данные указывают на необходимость такой организации процесса, при которой сокращается интенсивность окисления расплава в форме и вероятность сосредоточения продуктов окисления в местах, отвечающих за служебные свойства отливки в целом. Решению этих задач посвящены работы таких известных Российских ученых как М.Б. Альтман, Г.Ф. Баландин, А.А. Бочвар, А.И. Вейник, Н.М. Галдин, Н.П. Дубинин, Г.М. Дубицкий, И.Б. Куманин, А.В. Курдюмов, А.А. Неуструев, Е.М. Ноткин, Б.В. Рабинович, А.Г. Спасский, М.В. Шаров, Б. С. Чуркин и других исследователей [32, 33, 34, 35, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41].

Изучение процесса и активные поиски новых решений при литье в кокиль легких, в том числе и алюминиевых сплавов, продолжаются как у нас в стране, так и за ее пределами [42, 43, 44, 45]. Исследования профессоров В.А. Изотова, А.Ю. Коротченко, В.С. Моисеева, А.Ф. Смыкова, А.А. Шатульского, В.В. Чистякова и других ведущих специалистов-литейщиков показали [3, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55] возможность существенного сокращения поиска оптимального варианта технологического процесса, в том числе и новых вариантов его реализации, путем использования современных средств вычислительной техники.

Так, например, в работе [56] приводятся результаты освоения технологии, разработанной с использованием современных средств моделирования, обеспечивающей снижение массы алюминиевой отливки с 600 до 320 кг и повышающей  $K_{\text{ИМ}}$ . В другом источнике [3], показано комплексное решение проблем, возникающих при изготовлении для авиационной и ракетной техники крупногабаритных сложных корпусных литых деталей и заготовок из высокопрочных магниевых сплавов, в том числе, автоматизации процессов обеспечения направленности затвердевания и непрерывности питания отливок в кокилях. Вопросы моделирования процессов заливки и кристаллизации отливок решались авторами в программной среде «ProCAST».

Это обуславливает важность развития этих методов и поиска критериев для количественной оценки результатов моделирования процесса заливки, разрабатываемой оснастки. Известные критерии для такой оценки, например, степени за-

грязненности материала отливки оксидами, по результатам числительных экспериментов, такую возможность обеспечивают не в полной мере.

В связи с этим, совершенствование средств, предназначенных для исследования процессов, происходящих в каналах литниковой системы и формообразующей полости формы при ее заливке, путем использования вычислительной техники, а также разработка критериев для количественной оценки результатов вычислительных экспериментов является актуальной задачей.

Цель работы – повышение механических свойств литых деталей и заготовок из алюминиевых сплавов при литье в кокиль, путем минимизации образования оксидных включений в каналах и формообразующих полостях литейной формы и создания условий для такого их распределения по объему расплава, которое бы способствовало повышению служебных свойств отливок в целом.

Основные положения, которые выносятся на защиту:

– применение разработанных методов снижения загрязненности отливок оксидными включениями, предусматривающих оценку степени поражения расплава оксидами и вероятности их перераспределения по объему отливки, использование средств для сосредоточения оксидов в литниковой системе или ненагруженных частях отливки, обеспечивают прогнозирование характера поражения сплава продуктами окисления и, следовательно, служебных свойств литого изделия в целом;

– Предложенная реологическая модель и установленные параметры этой модели на начальном этапе формирования связанной структуры в расплаве, находящегося в температурном интервале кристаллизации, обеспечивают применимость разработанных методов снижения содержания оксидных включений в отливках, в том числе, и при таких условиях, когда кристаллизация расплава начинается на этапе заполнения формообразующей полости;

– использование критерия загрязненности металла оксидными включениями, позволяет повысить точность прогнозирования загрязненности материала от-

ливки оксидными пленами и их фрагментами, а также их распределения по объему расплава.

#### Научная новизна:

1. Разработаны методы снижения загрязненности отливок оксидными включениями, предусматривающие оценку степени поражения расплава оксидами, вероятности их перераспределения по объему отливки и средства, обеспечивающие сосредоточение оксидных включений в литниковой системе или ненагруженных частях отливки;

2. Разработана методика определения параметров реологической модели расплава в температурном интервале его кристаллизации на начальном этапе формирования связанной структуры путем использования стандартной спиральной пробы на жидкотекучесть;

3. Для оценки степени загрязненности отливок оксидными включениями предложен критерий, учитывающий изменение площади свободной поверхности расплава при заполнении литейной формы, температуру заливки расплава и компонентный состав сплава.

#### Практическая значимость работы.

Оптимизация технологии изготовления отливок из алюминиевых сплавов с использованием коэффициента загрязненности металла, позволяет повысить точность расчетов литниковых систем и прогнозирования загрязненности отливок оксидными включениями.

Моделированием процесса заливки подтверждено то, что при заполнении кокилей *Al-Si-Mg* сплавами наиболее интенсивное образование оксидных плен на свободной поверхности расплава и их замешивание происходит на начальном этапе заполнения, когда возмущенность потока расплава в каналах формы, включая литниковую чашу, и концентрация кислорода и кислородосодержащих продуктов в ее полостях максимальны;

При использовании нижних и боковых литниковых систем управление скоростью расплава в питателе на начальном этапе заполнения формы и содержи-

ем неметаллических включений в кокильных отливках возможно путем использования промывников, соединенных с коллектором через дроссель;

При использовании верхних литниковых систем для высоконагруженных массивных отливок из алюминиевых сплавов управление их загрязненностью оксидами и, следовательно, пористостью возможно путем сосредоточения плен и фрагментов таких включений в промывниках или частях отливки не оказывающих существенного влияния на служебные свойства литого изделия;

Использование результатов диссертационной работы на предприятии АО «Электросетьстройпроект» существенно сократило сроки доводки техпроцессов изготовления высоконагруженных кокильных отливок из алюминиевых сплавов и обеспечило их служебные характеристики при повышении  $K_{им}$  в 1,5...3,3 раза (приложение А).

Результаты выполненных в работе исследований в виде алгоритма анализа итогов численного моделирования работы литниковых систем и методических указаний к практическим занятиям используются в учебном процессе на кафедре «Литейные технологии» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана в дисциплине «Автоматизированное проектирование технологии литья», при выполнении курсовых научно-исследовательских работ и проектов, подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров, магистров и специалистов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений.

В первой главе приведен анализ литературных данных по вопросам зависимости механических свойств отливок от степени загрязненности их материала оксидными включениями. Рассмотрены факторы, влияющие на характер течения расплава в каналах литейной формы и ее формообразующей полости, оказывающие существенное влияние на кинетику окислительных процессов. Показаны преимущества и недостатки использования нижних, боковых и верхних литниковых систем при получении деталей и заготовок литьем в кокиль алюминиевых сплавов. Проанализированы существующие представления о реологических свой-

ствах сплавов, определяющих характер заполнения каналов и полостей литейной формы и, следовательно, влияющих на развитие окислительных процессов в них. Рассмотрены известные критерии и методики оценки вероятности загрязнения отливки оксидными включениями, проанализированы их преимущества и недостатки.

На основании результатов литературного обзора и анализа данных сформулированы цели и задачи исследований, выполненных в работе.

Во второй главе разработан критерий  $K_{OF}$  загрязненности металла оксидными включениями, позволяющий прогнозировать степень поражения отливки оксидными пленами и их фрагментами по результатам численного моделирования заливки кокиля. Доказана возможность его применения путем сравнительного анализа результатов численных экспериментов, выполненных в работе, с результатами натурных исследований М.В. Шарова и Н.М. Галдина [41]. Оценено максимально возможное количество оксидов, которое будет образовываться в каналах и полостях металлической (газонепроницаемой) литейной формы при ее заполнении алюминиевым сплавом. Установлены реологические свойства сплава АК9 находящегося в интервале кристаллизации и имеющего разрушенную структуру.

В третьей главе показана возможность применения критерия  $K_{OF}$  при исследовании влияния технологических параметров (температуры заливки расплава и его компонентного состава, положения отливки в форме, особенностей конструкции и наличия дополнительных элементов литниковой системы) на степень загрязненности отливки оксидными включениями. Выполнена оценка возможной средней толщины оксидной плены, образующейся на свободной поверхности расплава при использовании верхних литниковых систем.

Четвертая глава посвящена апробации результатов диссертационной работы и внедрению их в производство. Показаны примеры использования разработанной методики сравнительной оценки технологических решений, полученных с использованием программ (FLOW-3D, ProCAST) для моделирования литейных про-

цессов на ЭВМ, а также других результатов работы при проектировании технологии и оснастки для производства отливок электротехнического назначения с высокими требованиями по прочности и пластичности. Результаты, полученные с использованием этого сравнительного анализа, обеспечили не только необходимые механические свойства отливок, но и значительное сокращение объема финишных операций и увеличение  $K_{им}$ . При этом для реализации новых вариантов процессов использовались не только нижние и боковые литниковые системы, но и верхние системы подвода расплава.

# 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Влияние оксидных включений на механические свойства отливок из алюминиевых сплавов

То, что механические свойства отливок из алюминиевых сплавов в значительной степени определяются загрязненностью материала оксидами, сравнительно давно установленный факт. Изучению этого вопроса посвящено большое число исследований как у нас в стране, так за рубежом [26, 57, 25, 20, 19, 58, 59].

Так, например, с помощью структурной пробы А.Г. Спасский и Е.Н. Кулагина [60] еще в 1950-е годы установили взаимосвязь между содержанием дисперсных включений и кристаллическим строением слитков. Эта зависимость показывает, что с увеличением концентрации мелкодисперсных оксидных включений уменьшается размер зерен слитка, вследствие чего повышается его прочность, но снижается пластичность.

В 1960-е годы А.В. Курдюмов, И.Б. Куманин и Л.А. Алексеев (рисунок 1.1) [60, 25] подтвердили эту взаимосвязь и установили влияние концентрации мелкодисперсных оксидов на механические свойства литейного сплава АЛ4 (АК9).

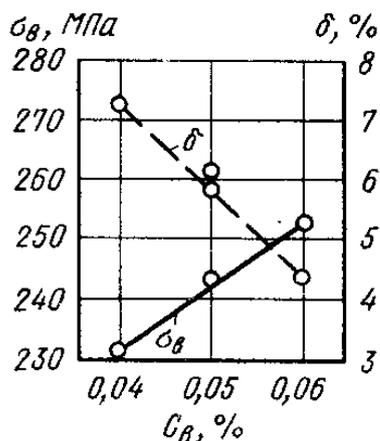


Рисунок 1.1 – Зависимость свойств сплава АЛ4 от концентрации оксидных включений [73, 25]

Видно, что с повышением концентрации оксидов происходит некоторое увеличение прочности ( $\sigma_b$ , МПа), однако относительное удлинение ( $\delta$ , %) при этом снижается более чем в 1,5 раза.

Вместе с тем другими исследователями установлено, что крупные неметаллические включения и пленки не оказывают влияния на размер зерен, но могут оказывать существенное влияние на развитие усадочной пористости в отливках [21, 59].

В работе [21] исследовалось влияние состава *Al-Si* сплавов, их температуры заливки и источника загрязнений оксидами на пористость отливок-образцов. Было установлено, что естественные включения, образующиеся, например, во время металлургических процессов или при заливке формы, оказывают более существенное отрицательное влияние на пористость отливок, чем «искусственное» загрязнение расплава окисленной стружкой. При этом, чем в большем температурном интервале происходит затвердевание расплава, тем существеннее становится влияние естественных загрязнений на пористость отливок. Так, при одинаковой загрязненности отливок из сплава *Al-Si11,7* (интервал кристаллизации  $\Delta T_{кр} \approx 0K$ ) пористость ухудшается на 7,2%, из сплава *Al-Si7* ( $\Delta T_{кр} \approx 28K$ ) на 8.2%, из сплава *Al-Si17* ( $\Delta T_{кр} \approx 73 K$ ) на 15%.

Вследствие повышения пористости, наряду со снижением прочности и пластичности падают такие важные характеристики отливок, как герметичность и электропроводность. Пленки в литейных сплавах снижают его жидкотекучесть, вызывая брак по «неслитинам» при получении тонкостенных изделий [1, 60].

Заметим, что в приведенных результатах исследований авторы не выделяют влияние оксидов, образующихся в процессе заполнения формы, а в некоторых исследованиях расплав намеренно «заражался» оксидами путем введения в его состав окисленной металлической стружки. С точки зрения разработки литейной технологии и предварительной оценки качества работы литниковой системы, интерес представляют закономерности влияния на свойства отливок оксидов образующихся именно в процессе заполнения рабочей полости формы.

В настоящее время работы по вопросам формирования свойств отливок из алюминиевых сплавов продолжают с использованием современных технических средств, в том числе и металлографических, для определения механических свойств материалов и обработки данных.

Так в работе [19] установлено влияние оксидов, образующихся в процессе заливки кокиля на механические свойства отливок. Для исключения попадания неметаллических включений из ковша в формообразующую полость, в литниковой системе использовался специальный керамический фильтр 3 (рисунок 1.2). Кроме этого перед заливкой расплав дегазировался. После такой обработки содержание водорода в нем не превышало 0,11 мл / 100 г металла. Таким образом, авторы стремились свести к минимуму влияние других внешних факторов на свойства отливок.

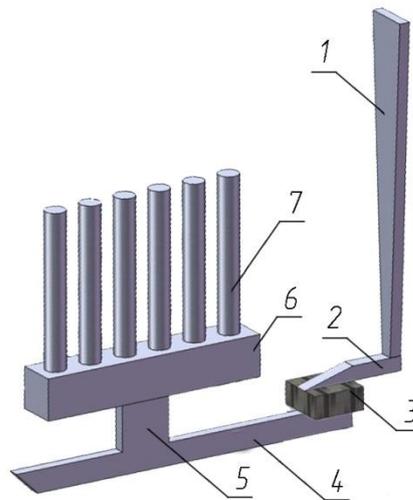


Рисунок 1.2 –Литые образцы с элементами литейной формы (кокиля): 1 – стояк; 2 – подводящий канал; 3 – фильтр; 4 – литниковый ход; 5 – питатель; 6 – прибыль; 7 – отливки-образцы для механических испытаний [19]

Эксперименты проводили с использованием двух вариантов литниковых систем, отличающихся высотой литникового хода 4, что приводило к изменению высоты падения расплава после фильтра. Заметим, что при высоте падения струи расплава 24 мм (максимальная высота литникового хода) ее скорость может превышать 0,69 м/с, что, по мнению Джона Кемпбелла [42], должно приводить к возмущению свободной поверхности расплава и замешиванию в него оксидных плен.

Для каждого варианта заливку осуществляли 4 раза и, таким образом, получили 24 образца для каждой литниковой системы. Кокиль заливали сплавом *AlSi7Mg* с начальной температурой 1023K. Сразу после заливки, форму медленно поворачивали на 180 ° и оставляли в таком положении на протяжении 10 минут, что обеспечивало направленное затвердевание образцов для испытаний. Массивная закрытая прибыль 6 (рисунок 1.2) на этапе заливки кокиля служила дополнительным коллектором, а так же могла создавать условия для продолжения окислительных процессов. После изготовления образцов они подвергались термической обработке по режиму *T6*, а затем механическим испытаниям. Результаты испытаний показаны на рисунке 1.3.

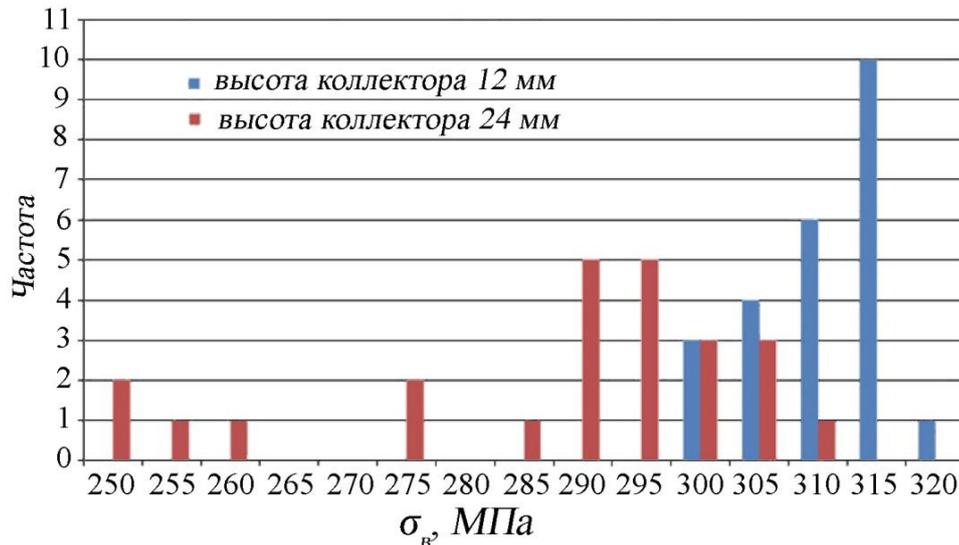
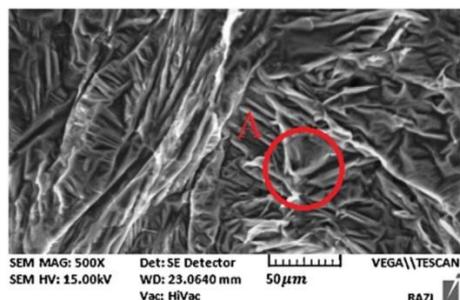


Рисунок 1.3 – Результаты механических испытаний [19]

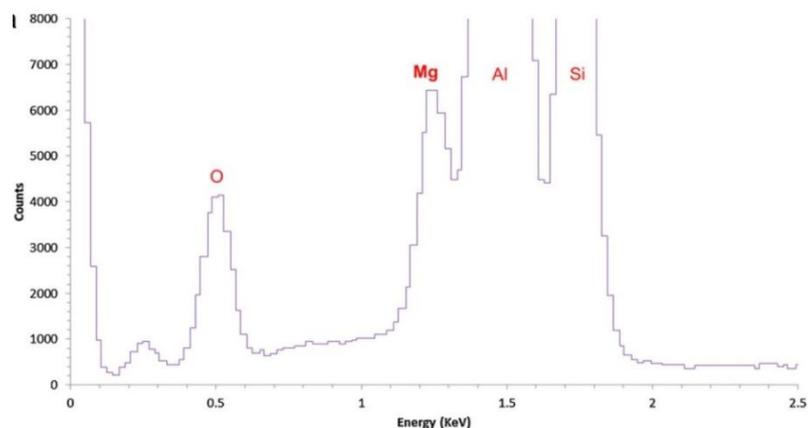
После статистической обработки данных установлено, что при использовании литникового хода высотой 12 мм предел прочности на растяжение составил  $\sigma_{\text{в}} = 307,74$  МПа, а относительное удлинение  $\delta = 4,52\%$ . Использование литникового хода высотой 24 мм снизило эти показатели до значений  $\sigma_{\text{в}} = 289,95$  МПа и  $\delta = 2,48\%$ .

Влияние оксидов на механические свойства в работе подтверждается исследованиями мест излома образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Результаты этого исследования показали значительное присутствие

$O_2$  в образцах с 24 мм литниковым ходом (рисунок 1.4), в то время как на 12 мм это присутствие установлено не было (рисунок 1.5).

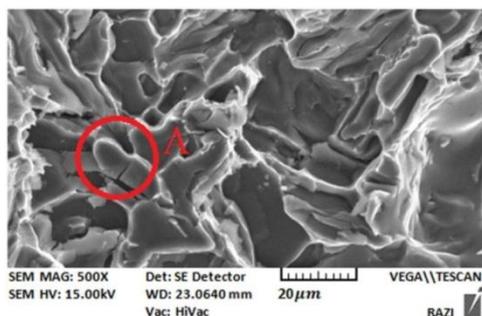


а)

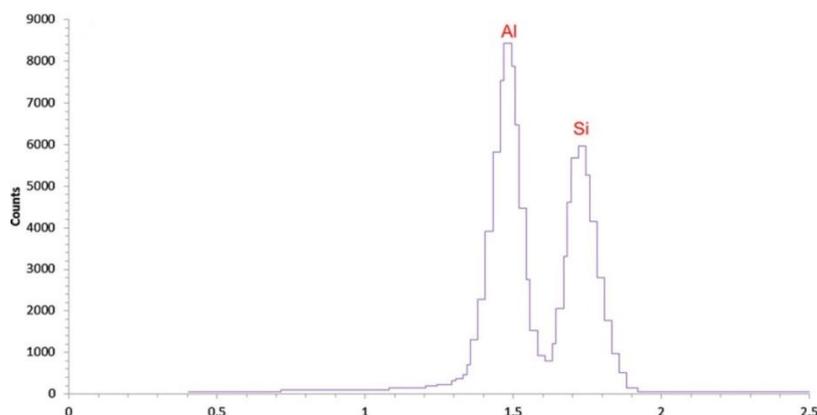


б)

Рисунок 1.4 – Результат микроанализа СЭМ-ЭДС, полученный для образцов с литниковым ходом 24 мм: а – структура поверхности разрушения образца; б – спектрограмма в точке А [19]



а)



б)

Рисунок 1.5 – Результат микроанализа СЭМ-ЭДС, полученный для образцов с литниковым ходом 12 мм: а – структура поверхности разрушения образца; б – спектрограмма в точке А [19]

Эти спектры ясно показывают, что в точке А (рисунок 1.4, литниковый ход с размером 24 мм) присутствует сильное отражение кислорода, магния и алюминия, а в точке А (рисунок 1.5, литниковый ход с размером 12 мм) отсутствие кислорода и магния.

Таким образом, было установлено существенное влияние размеров литниковой системы на процесс образования неметаллических включений в рабочей полости формы и их влияние на механические свойства отливок-образцов.

Зависимость загрязненности материала отливки и ее механических свойств от геометрии литниковой системы установлена в работе [20].

Было использовано три варианта литниковых систем, отличающихся только геометрией поперечного сечения коллектора (рисунок 1.6). Исследования выполнялись как путем численных (в программе FLOW 3D), так и натурных экспериментов. При этом оценка результатов численного моделирования заливки форм производилась путем визуального сравнения характера течения расплава при использовании литниковых систем разных конструкций.

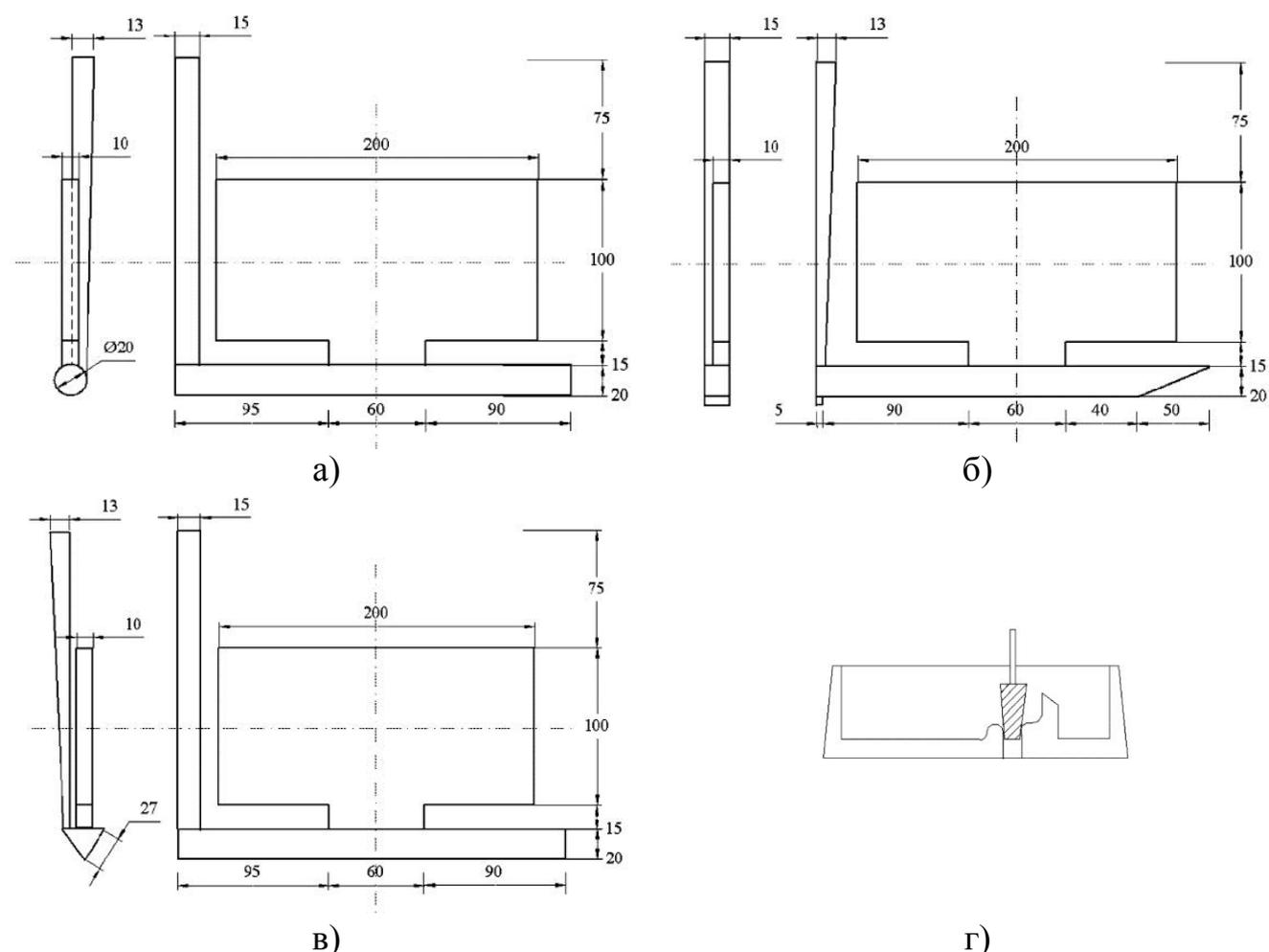


Рисунок 1.6 – Элементы экспериментальной литейной формы: а – цилиндрический литниковый ход; б – прямоугольный; в – треугольный; г – литниковая чаша со стопором [20]

Основной результат работы заключается в том, что авторам удалось подтвердить влияние вторичных, то есть образовавшихся в рабочей полости формы

оксидов, на развитие усадочных процессов (рисунок 1.7, 1.8). Поверхности разрушения образцов вырезанных из отливки исследовали с использованием СЭМ.

На рисунке 1.7 показана микроструктура поверхности разрушения образца, полученного с использованием прямоугольного литникового хода.

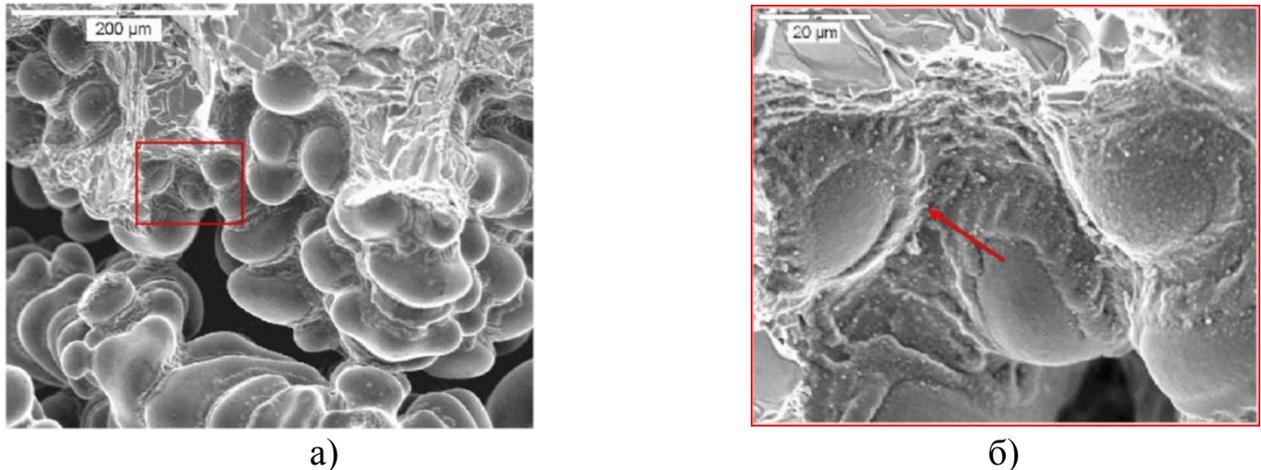


Рисунок 1.7 – Микроструктура поверхности разрушения образца, полученного с использованием прямоугольного литникового хода – а и увеличенное изображение выделенной области – б [20]

Стрелкой на рисунке 1.7, б авторами отмечены оксидные пленки на поверхности дендритов, затрудняющих питание и приводящих к междендритной пористости. Рисунок 1.8 иллюстрирует спектрограмму той же области.

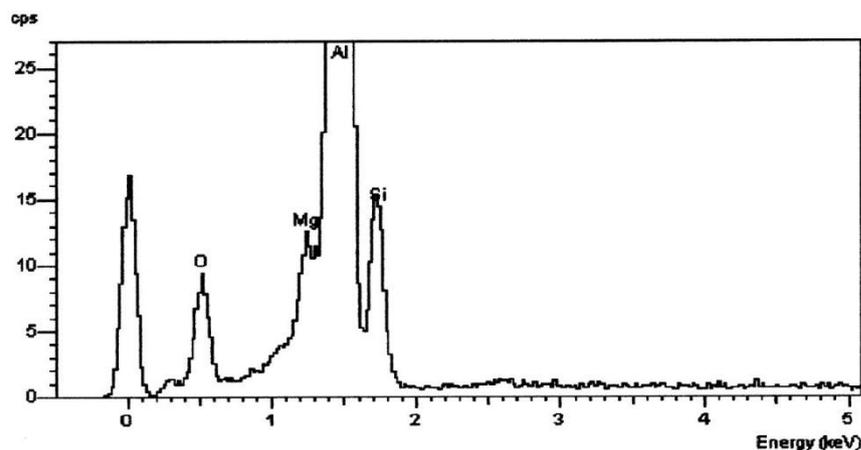


Рисунок 1.8 – Спектрограмма в месте, обозначенном на рисунке 1.7, б для прямоугольного литникового хода [20]

Для сравнения на рисунке 1.9 и 1.10 показаны результаты для цилиндрического литникового хода, из которых следует, что поражение отливки оксидными пленками стало значительно меньше.

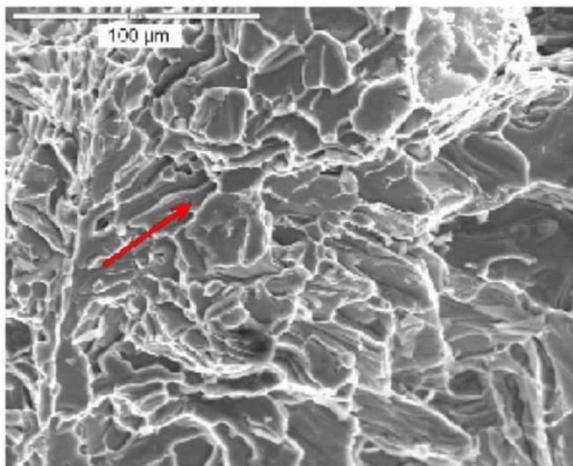


Рисунок 1.9 – Микроструктура поверхности разрушения образца, полученного с использованием цилиндрического литникового хода [20]

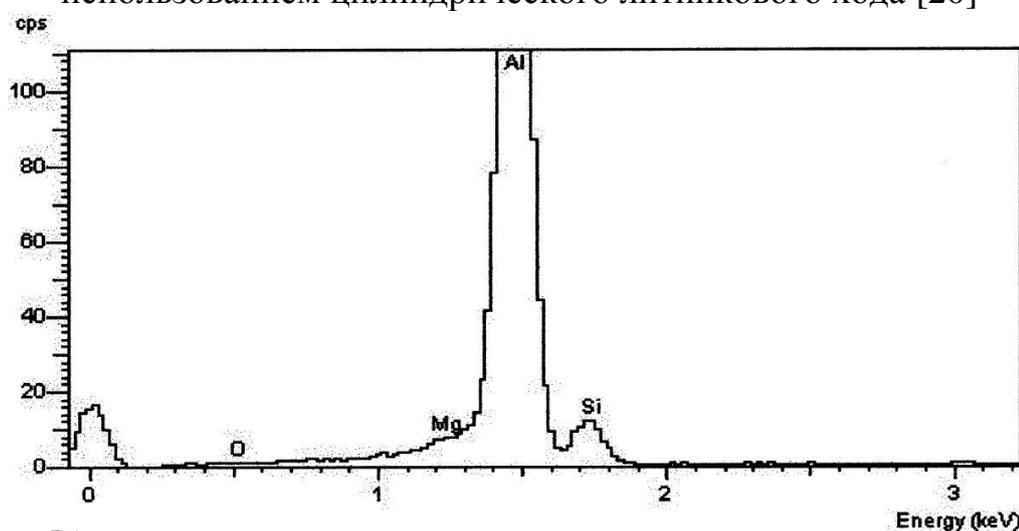
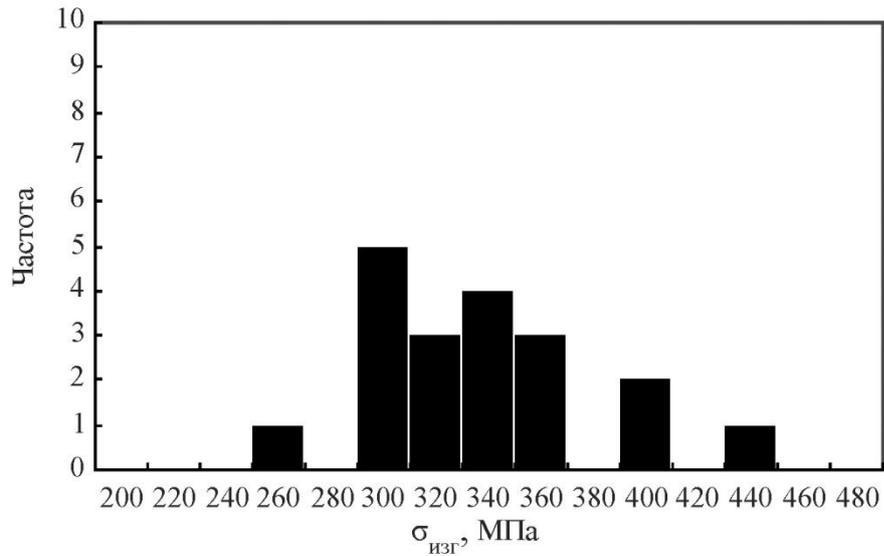
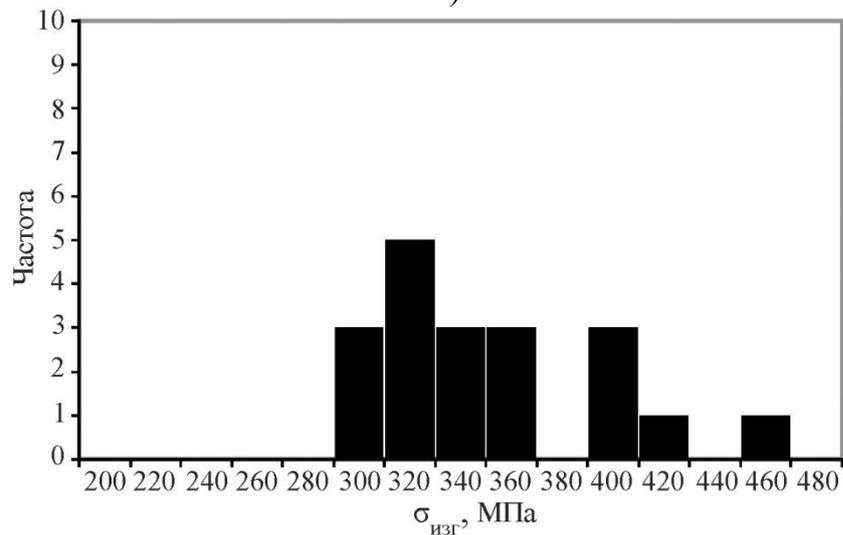


Рисунок 1.10 – Спектрограмма в месте, обозначенном на рисунке 1.9 для цилиндрического литникового хода [20]

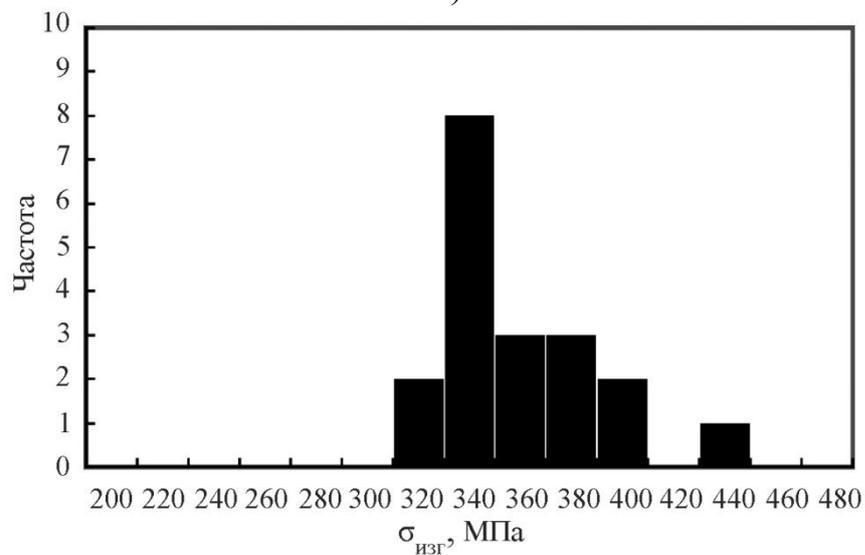
В этой работе также показано, что при использовании литниковой системы с цилиндрическим коллектором (рисунок 1.9) наблюдается (в программе Flow 3D) наиболее спокойное заполнение формы расплавом. Это, по мнению авторов, и обеспечивает максимальную прочность отливок, из которых вырезались образцы. На рисунке 1.11 приведены результаты механических испытаний на изгиб.



а)



б)



в)

Рисунок 1.11 – Гистограмма распределения предельной прочности  $\sigma_{\text{изг}}$  на изгиб: а – прямоугольный литниковый ход; б – треугольный; в – цилиндрический [20]

Для сравнительного анализа данных рисунка 1.11 нами был построен полигон накопительных частот предельной прочности  $\sigma_{изг}$  на изгиб для каждой литниковой системы (рисунок 1.12). Результаты этого построения наглядно иллюстрируют выводы авторов о том, что при использовании цилиндрического литникового хода (кривая 3) достигается как наивысшая прочность образцов, так и минимальный разброс ее значений.

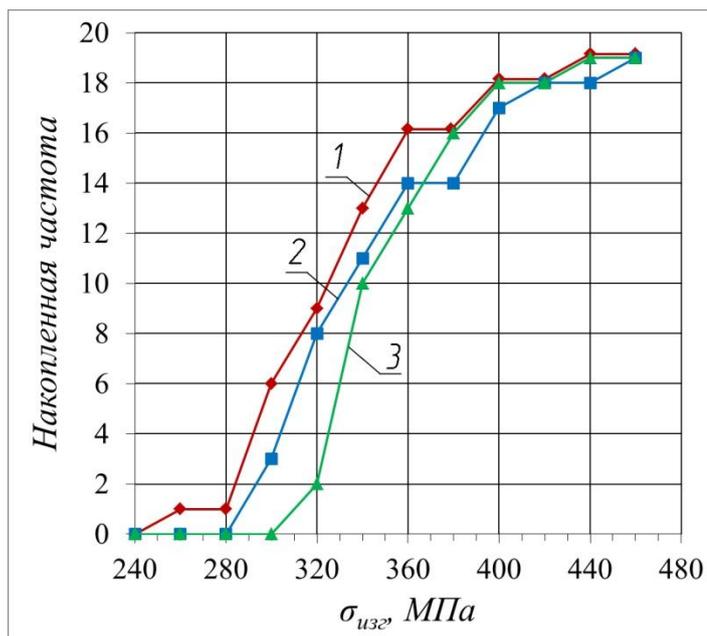


Рисунок 1.12 – Полигон накопительных частот  $\sigma_{изг}$  для 19 образцов из сплава AlSi7Mg: 1 – прямоугольного литникового хода; 2 – треугольного; 3 – цилиндрического

В работе [22] показано, что механические свойства отливок из алюминиевых сплавов в существенной степени определяются и положением отливки в форме при ее заливке расплавом.

#### **Выводы по разделу:**

1. Оксидные включения в алюминиевых сплавах оказывают существенное, чаще всего, негативное влияние на механические свойства литых изделий. Наиболее вероятная причина этого влияния обусловлена повышением пористости отливок с увеличением содержания в расплаве оксидов в виде плен;

2. Оксидные пленки и их фрагменты, образующиеся в процессе заполнения каналов формы и ее формообразующей полости, снижают прочность и пластичность материала отливок;

3. Заполнение формы расплавом при режимах исключаяющих или снижающих вероятность образования таких включений и их сосредоточения в ответственных частях отливки – основной способ противодействия их негативному влиянию.

### **1.2 Анализ существующих представлений о процессе окисления расплава**

На загрязненность отливки из алюминиевых сплавов окисными пленками или их фрагментами оказывают влияние различные факторы. К ним относятся физико-химические свойства расплава – химический состав, вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения и другие, а также технологические параметры – температура расплава и формы, положение формообразующей полости при заливке, продолжительность ее заполнения, способ подвода расплава в формообразующую полость, геометрия подводящих элементов литниковой системы и рабочей полости. Перечисленные факторы и параметры могут снижать или интенсифицировать окислительные процессы, приводить к таким явлениям как воронкообразование, фонтанирование, волнообразование, а также влиять на циркуляцию расплава внутри потока. Известно, что предотвращение подобных явлений и назначение оптимальных параметров процесса литья способствует снижению содержания в теле отливки дефектов окислительного и усадочного происхождения и, тем самым, в значительной степени улучшению механических характеристик литых заготовок и деталей [24, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 38, 67, 68, 69, 70].

Окисление алюминиевых сплавов происходит на всех этапах литейной технологии. Оно начинается еще в плавильной печи, продолжается в разливочном ковше и в основном завершается после заполнения формы расплавом. Вместе с тем, кинетика протекания этих процессов на каждом этапе существенно отличается. По месту и условиям образования оксидных включений в расплаве они могут быть условно разделены на следующие группы:

–окисление в печи и ковше – стационарное окисление жидкого металла, характеризующееся наличием оксидной пленки на свободной поверхности и незна-

чительным ее обновлением. Очевидно, что такие условия способствуют образованию плен с максимальной толщиной, зависящей от продолжительности выдержки расплава в устройствах;

–окисление струи расплава, поступающего в литниковую чашу и заполняющего подводящие элементы литниковой системы – динамическое окисление, с постоянным обновлением свободной поверхности. Толщина плен при этом будет минимальной, а суммарная масса включений, образующихся в единицу времени, существенно возрастет;

–процессы, происходящие при заполнении рабочей полости, протекают в смешанном режиме, занимающем промежуточное положение между первыми двумя. В зависимости от характера потока в формообразующей полости, они могут сопровождаться постоянным обновлением свободной поверхности, т.е. соответствовать динамическим условиям, либо идти без него, следовательно, быть ближе к стационарным условиям.

На скорость окисления оказывают влияние не только физические условия протекания реакции, включая и температурные (рисунке 1.13 а), но и химический состав самого расплава. Так, на рисунке 1.13 [60] показано влияние некоторых легирующих элементов на кинетику химической реакции. Видно, что такие элементы как *Mg* и *Na* оказывают наиболее существенное влияние на этот параметр. При этом, следует отметить, что первый является одним из основных легирующих элементов в сплавах системы *Al – Si* (АК7, АК9, АК5М2, АК9М2 и др.), а другой может присутствовать в расплаве, например вследствие его рафинирования.

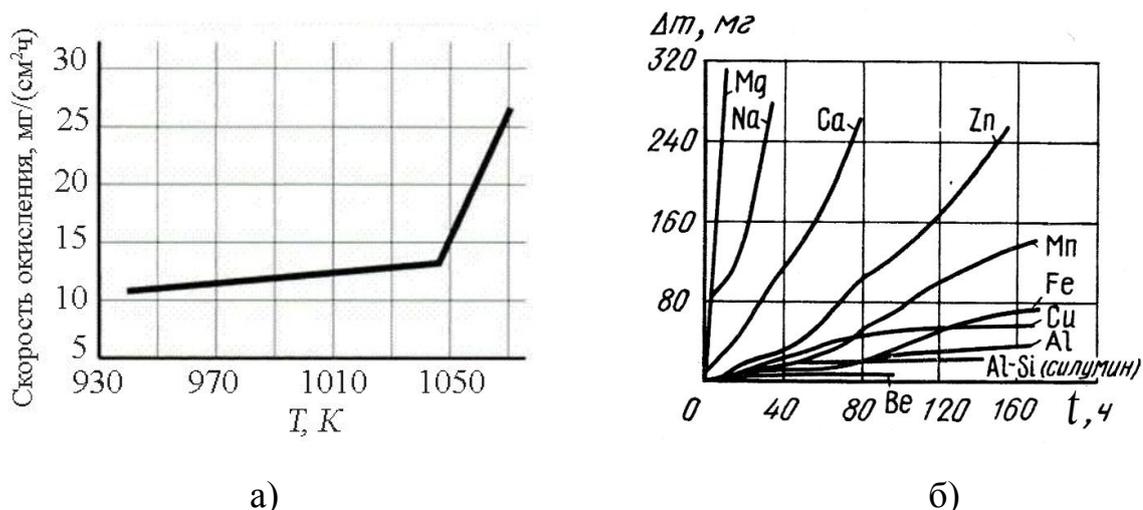


Рисунок 1.13 – Зависимость скорости окисления от: а) температуры жидкого алюминия [71]; б) легирующих добавок [60]

В работе [72] приводятся данные А.Я. Радина, согласно которым, с увеличением содержания  $Mg$  количество оксидов, образующихся на свободной поверхности расплава, может увеличиваться в 120...300 раз по сравнению, например, с чистым алюминием или при наличии других легирующих элементов. В работах [73, 74] это объяснено тем, что при содержании в расплаве алюминия более 1%  $Mg$ , плена на свободной поверхности в основном состоит из оксидов магния или шпинеля  $Al_2O_3 \cdot MgO$ , имеющих «рыхлую» структуру и не способных предохранить расплав от взаимодействия с газовой атмосферой печи или литейной формы.

В условиях динамического окисления алюминиевых сплавов скорость реакции в значительной степени зависит и от парциального давления окислителя [75].

Таким образом, согласно литературным данным в зависимости от условий протекания реакции окисления (температура расплава, его химический состав, парциальное давление  $O_2$  и других факторов) толщина образующейся плены может изменяться в достаточно широких пределах (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Толщина окисных плен на свободной поверхности расплава  
алюминиевого сплава

Источник	Толщина, мкм	Условия образования оксидов
[60]	0,1-10,0	Окисление жидкого алюминия на воздухе
[36, 52]	5,0	Окисление алюминиевого расплава при спокойном заполнении формы
[75]	0,9	Окисление жидкого алюминия на воздухе
[72]	0,15-0,2	Окисление алюминиевого расплава
[76]	0,1-0,5	Окисление алюминиевого расплава при заполнении формы
[13]	0,2	Окисление при плавке и литье алюминиевых сплавов
[77, 42]	0,001-1,0	Окисление алюминиевого расплава при заполнении формы
[42]	10,0	Окисление алюминиевого расплава в ковше
[42]	100	Окисление алюминиевого расплава в плавильной печи
[42]	1000	Окисление алюминиевого расплава в раздаточной печи

Наиболее близкие к литью в кокиль условия протекания окислительных процессов изучены М.Н. Галдиным и В.В. Чистяковым в работах [36, 52]. Это позволяет принять в расчетах, при использовании нижних литниковых систем, значение толщины оксидной пленки равным 5 мкм.

Вместе с тем, кроме количества и размеров оксидных включений, поступающих с расплавом или образующихся во время заполнения формы, значительное влияние на механические свойства отливки или отдельных ее частей, очевидно, оказывает и распределение включений по объему литого изделия.

Вопросы перераспределения  $Al_2O_3$  по объему плавильной индукционной печи до (таблица 1.2) и после перелива расплава в раздаточную печь сопротивления (таблица 1.3) рассмотрены в работе [78].

На основании данных таблицы 1.2 делается вывод о том, что «при включенной печи ИАТ-2,5 за счет динамических потоков металла концентрация примесей

во всем объеме ванны практически одинакова. Однако достаточно 10мин выдержки металла после выключения печи для перераспределения загрязнений и перемещения их в нижние слои расплава». Аналогично развиваются процессы и в раздаточной печи (таблица 1.3) , что свидетельствует об интенсивной седиментации неметаллических примесей в алюминиевых расплавах.

Таблица 1.2 – Концентрация примесей в индукционной плавильной печи [78]

Время отбора проб	Содержание $Al_2O_3$ , %		
	Верх	Середина	Низ
Сразу после отключения печи	0,053	0,051	0,053
Через 5 мин после отключения печи	0,045	0,054	0,056
Через 10 мин после отключения печи	0,036	0,056	0,062

Таблица 1.3 – Концентрация примесей в раздаточной печи сопротивления [78]

Время отбора проб	Содержание $Al_2O_3$ , %		
	Верх	Середина	Низ
Сразу после перелива	0,049	0,049	0,047
Через 15 мин	0,041	0,043	0,046
Через 30 мин	0,037	0,042	0,049
Через 60 мин	0,032	0,044	0,051

Также в этой работе показано, что окисные частицы с размером более 100мкм не уравниваются силами вязкого сопротивления расплава, и такие частицы свободно оседают. Таким образом, основными факторами, влияющими на распределение неметаллических примесей в алюминиевых расплавах, при рассмотренных условиях, являются седиментация частиц и их перенос потоками жидкого металла.

Естественно, что такие процессы происходят и в литейной форме. Их основное отличие – кратковременность, а также действие струи расплава, поступающего в формообразующую полость («перелив» по терминологии работы [78]), которая может способствовать переносу и тем самым выравниванию концентрации примесей по объему или наоборот ее повышению в отдельных частях отлив-

ки. Во многих случаях это может быть нежелательным явлением, повышающим содержание оксидов, например, в наиболее ответственных частях отливки, отвечающих за механические свойства или герметичность изделия в целом. Из этого вытекает то, что технологические параметры процесса, конструкция литниковой системы и другие факторы должны снижать вероятность образования таких потоков или обеспечивать минимизацию скорости расплава в них.

### ***Выводы по разделу:***

1. В зависимости от условий протекания реакции окисления (температуры расплава, его химического состава, парциального давления  $O_2$ , длительности контакта расплава с атмосферой формы и других факторов) толщина пленки, образующейся на этапе заливки формы, может изменяться в достаточно широких пределах;

2. Снижение вероятности перераспределения оксидных включений по объему отливки при гравитационном заполнении рабочей полости формы возможно путем уменьшения скорости восходящих потоков.

## **1.3 Особенности конструкции нижних и боковых литниковых систем для алюминиевых сплавов**

Выбор способа подвода металла и типа литниковой системы во многом определяется материалом отливки, ее конфигурацией, размерами, а также требованиями, предъявляемыми к детали, получаемой литьем или из литой заготовки.

Одним из условий, которому должна удовлетворять литниковая система при литье легкоокисляющихся сплавов, является возможность управления скоростью подвода расплава в формообразующую полость формы [26, 79]. Применение нижней литниковой системы, чаще всего позволяет осуществить такое управление, например, путем использования ее расширяющейся конструкции, в которой питатель имеет максимальное проходное сечение, а также использованием местных или распределенных дополнительных гидравлических сопротивлений (дрос-

селей, керамических фильтров, стояков со сложной геометрией и др.) [80, 81, 63, 82].

Расчет сечений элементов литниковой системы выполняют исходя из величины расхода  $Q_{\phi}$  расплава, который должен обеспечивать заполнение литейной формы с допустимой турбулентностью потока за установленный промежуток времени, т. е. с соблюдением следующего условия [26]:

$$Q_{\phi \min} \leq Q_{\phi} \leq Q_{\phi \max}, \quad (1.1)$$

где  $Q_{\phi \min}$  – минимальный расход расплава, обеспечивающий заполнение литейной формы без образования неслитин и недоливов;

$Q_{\phi \max}$  – максимально-допустимый расход, создающий условия для спокойного заполнения формы расплавом.

Исходя из этого Н. М. Галдин выделяет три основные методики расчета литниковых систем для легкоокисляющихся сплавов [26]. К первой он относит расчеты выполненные, исходя из условия обеспечения оптимальной продолжительности заливки. Под оптимальной понимают такую (промежуточную между верхними и нижними предельными значениями) продолжительность заливки, при которой обеспечиваются наивысшие показатели качества отливок. Применительно к литью алюминиевых сплавов этот метод развивался в работах Г. Дросселя, М. Роланда, Г.М. Дубицкого и других исследователей [26, 79].

Ко второй группе относятся расчеты, основанные на минимально допустимой турбулентности потока. Здесь подразумевается такая скорость заполнения, при которой минимизируется вероятность разрушения оксидной пленки образовавшейся на поверхности расплава и замешивание ее вглубь потока. В данном направлении работали Е.М. Ноткин, Н.М. Галдин и другие [52, 41].

К третьей группе относится расчет обеспечивающий заполняемость формы, т. е. расчет предотвращающий появление таких дефектов как неслитины и недоливы. Формулы для определения минимально-возможной скорости заполнения формы были получены Г.М. Дубицким, В.М. Воздвиженским, В.В. Чистяковым, В.Д. Топоровым и др. исследователями [26, 63, 83].

Как уже отмечалось, значительным недостатком нижнего подвода расплава является появление перегретой области напротив действия питателей. То есть использование нижней литниковой системы позволяет уменьшить содержание в теле отливки оксидных плен, но при этом увеличивается вероятность появления усадочных дефектов. В некоторой степени этот недостаток позволяют исключить боковые системы и особенно их щелевые разновидности.

Предложенные акад. А.А. Бочваром и проф. А.Г. Спасским вертикально-щелевые литниковые системы [79] сочетают достоинства нижних и верхних систем. Они позволяют, в некоторой степени, управлять начальной скоростью заполнения формы, как и при сифонном подводе расплава, а также обеспечивают температурное поле в отливке, способствующее ее направленной кристаллизации, как и верхние системы. Общим и наиболее существенным их недостатком является высокая масса, что снижает  $K_{им}$  технологического процесса. Но существуют решения [84], позволяющие отказаться от некоторых элементов, щелевой литниковой системы и тем самым упростить оснастку и несколько повысить  $K_{им}$ . Так, например, в конструкции такой системы, представленной на рисунке 1.14 б, роль щелевого питателя выполняет сама отливка.

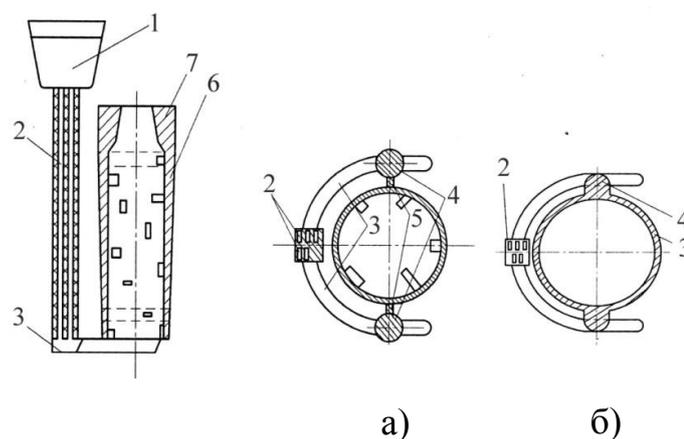


Рисунок 1.14 – Схема вертикально-щелевой литниковой системы: а– традиционная система; б– система без щелевого питателя; 1– литниковая чаша; 2– стояк; 3– литниковый ход 4– колодец 5– щель; 6– отливка; 7– прибыль

**Выводы по разделу:**

1. Применение нижних литниковых систем для получения отливок из легкоокисляющихся сплавов позволяет управлять скоростью подвода расплава и, тем самым, содержанием оксидных плен и их фрагментов в готовом изделии;
2. Недостаток нижнего подвода, связанный с перегревом нижних слоев формы, для высоких отливок решается применением вертикально-щелевых литниковых систем. Данная конструкция способствует обеспечению такого распределения температур в расплаве на момент завершения заполнения, которое создает условия для направленной кристаллизации отливки. При этом такие системы подвода сохраняют возможность управления скоростью потока расплава, заполняющего рабочую полость формы.

**1.4 Применение верхних литниковых систем для отливок из алюминиевых сплавов при литье в кокиль**

Из всех типов литниковых систем верхняя система создает наиболее благоприятные условия для последовательной и направленной кристаллизации отливок. Она обеспечивает высокий  $K_{им}$ , постоянство расхода расплава и в наибольшей степени препятствует развитию местных перегревов формы. Основным недостатком, приводящим к ограниченности ее применения при литье легкоокисляющихся сплавов— каскадный сброс расплава в формообразующую полость формы, что приводит к его интенсивному перемешиванию и окислению [26, 85]. Отливка при этом поражается оксидными пленами и их фрагментами, у литых деталей и заготовок снижается прочность, пластичность и герметичность. Преимущества верхних литниковых систем при этом становятся не определяющими. По этой причине авторы многих работ по вопросам конструирования литниковых систем не рекомендуют системы такого типа для средних и особенно высоких отливок из легкоокисляющихся сплавов, в том числе и алюминиевых [26, 79, 37].

И, тем не менее, успешное использование верхних литниковых систем, при получении весьма ответственных отливок, на практике встречается даже в усло-

виях массового производства, например, при изготовлении поршней из алюминиевых сплавов для двигателя легкового автомобиля (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Поршень двигателя легкового автомобиля (фотография отливки с литниковой системой)

При этом, вероятно, что использование боковой щелевой литниковой системы для подобных отливок [86, 87, 88] приведет к значительному браку.

Известны примеры, когда для получения сравнительно высоких отливок из алюминиевых сплавов используют поворот кокиля при его заливке на специальных машинах [89]. Использование такого приема реализуется, как правило, путем применения сложного автоматического оборудования в условиях массового производства, например, в автомобильной промышленности.

В работе [85], которая обобщает результаты исследований, касающихся литниковых систем для алюминиевого литья в кратные формы, исследовалась, в том числе и возможность применения фильтров для решения проблемы загрязненности металла. В результате показано, что использование фильтров в верхних системах не улучшает, а в некоторых случаях ухудшает качество отливок вследствие увеличения дефектов образующихся в самой формообразующей полости. При этом использовались как численные, так и натурные эксперименты.

Особых рекомендаций по расчету проходных сечений элементов верхних литниковых систем, за исключением дождевой литниковой системы, нет. Он выполняется, как правило, по тем же рекомендациям, что и при применении нижнего подвода расплава.

Возможность использования дождевых литниковых систем при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов показана в работах, выполненных под руководством профессора В.А. Изотова. В одной из них [90], приведена зависимость степени загрязненности отливки от силы  $N$  удара струи поступающего в форму расплава по его зеркалу.

Эту силу рассчитывали по формуле:

$$N = 2\rho\pi r^2 g\mu\sqrt{H(\mu^2 H + h)}, \quad [55] \quad (1.2)$$

где

$\rho$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;

$r$  – радиус нижнего сечения стояка, м;

$\mu$  – коэффициент расхода;

$H$  – напор расплава в чаше, м;

$h$  – высота падения струи до его зеркала, м.

Было установлено критическое значение этой силы, которое для алюминиевых сплавов составляет 0,2 Н (рисунок 1.16).

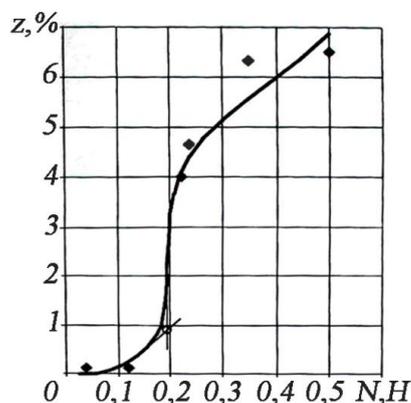


Рисунок 1.16 – Зависимость загрязненности материала отливки от силы  $N$  удара струи расплава [90]

В других работах этих авторов, например [91], приводятся сведения об отливках из алюминиевых сплавов и условиях правильного функционирования литниковых систем, обеспечивающих требуемые характеристики изделий.

#### **Выводы по разделу:**

1. Основной недостаток верхних литниковых систем, приводящий к ограниченности ее применения при литье легкоокисляющихся сплавов – каскад-

ный сброс расплава в формообразующую полость формы, что приводит к его разбрызгиванию, интенсивному перемешиванию и окислению расплава. Вместе с тем, существуют примеры их успешного применения на практике;

2. Дополнительные исследования особенностей окисления алюминиевых сплавов в литейной форме позволят расширить номенклатуру отливок изготавливаемых с использованием верхних литниковых систем.

### 1.5 Реологические свойства расплава

При изготовлении нагруженных отливок в электротехнической и других отраслях промышленности широко используется силумин АК9. Данный материал обладает высокой твердостью, жаропрочностью, средней коррозионной стойкостью. Его механические свойства могут быть существенно повышены путем термической обработки. Это послужило одной из основных причин выбора отливок из этого материала в качестве объекта исследования. Вместе с тем этот сплав содержит в своем составе 0.17 - 0.3% *Mg* что, как следует из материалов раздела 1.2, повышает его склонность к окислению и образованию оксидных плен, и может вызывать определенные трудности при получении из него отливок с высокой плотностью и механическими свойствами.

Реологические свойства, как этого силумина, так и других литейных сплавов определяют характер заполнения каналов и полостей литейной формы и, следовательно, влияют на развитие окислительных процессов в них. Известно, что расплав при температуре выше  $T_L$  можно рассматривать как несжимаемую ньютоновскую жидкость [40, 92, 93], течение которой в основном определяет динамическая вязкость.

Данные о вязкости перегретого сплава АК9 представлены на рисунке 1.17. Кривая 1 ( $\eta = -0.0244T + 29.068$ ) является результатом статистической обработки экспериментальных данных М.Б. Альтмана и Ф. Занга. При этом согласно исследованиям, выполненным Е.Г. Швидковским, вязкость алюминиевых сплавов, полученную экспериментальным путем, для использования в расчетах

следует увеличивать на ~30% с целью учета окисления расплава при литье [26, 27]. Зависимость вязкости от температуры с учетом этого фактора представлена на рисунке 1.17, кривая 2.

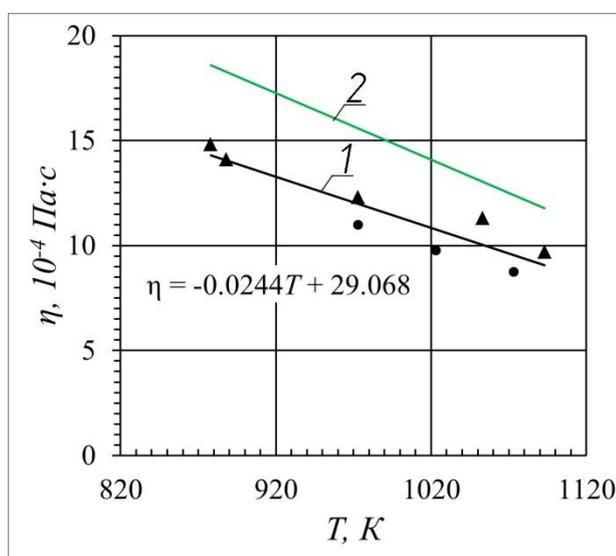


Рисунок 1.17 – Зависимость динамической вязкости  $\eta$  перегретого сплава АК9 от температуры: 1 – ▲ - [94]; ● - [95]; 2 – [27]

Г.Ф. Баландиным и Л.П. Каширцевым было установлено, что в интервале температур  $T_L \dots T_s$ , в зависимости от условий деформирования, расплав может быть с разрушенной или неразрушенной структурой. Поведение сплавов с разрушенной структурой подобно поведению ньютоновской жидкости [96]. Вместе с тем, сведения об изменении вязкости сплава АК9 в интервале кристаллизации по имеющимся литературным данным не установлены, за исключением данных, полученных Л.П. Каширцевым для сплава с неразрушенной структурой, которые естественно не соответствуют свойствам сплава не образовавшим связи между частицами твердой фазы.

Тем не менее, известно [40, 97], что вязкость как чистых металлов, так и сплавов резко увеличивается при приближении к температуре кристаллизации (рисунок 1.18).

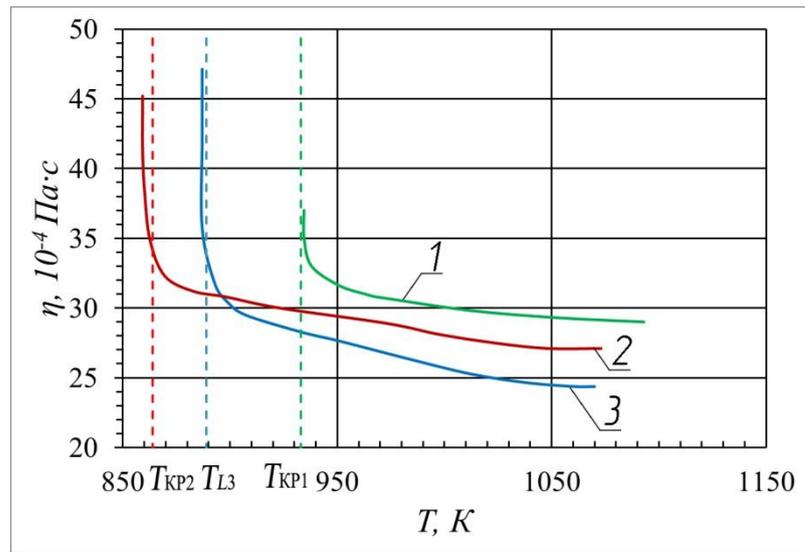


Рисунок 1.18 – Зависимость коэффициента динамической вязкости  $\eta$  от температуры: 1–для чистого алюминия [40]; 2–сплава АК12 [97]; 3– сплав АК7 [97]

Таким образом, основываясь на данных Е. Г. Швидковского [27] и работ [40] и [97], принимаем зависимость вязкости  $\eta$  сплава АК9 от температуры соответствующей кривой, представленной на рисунке 1.19.

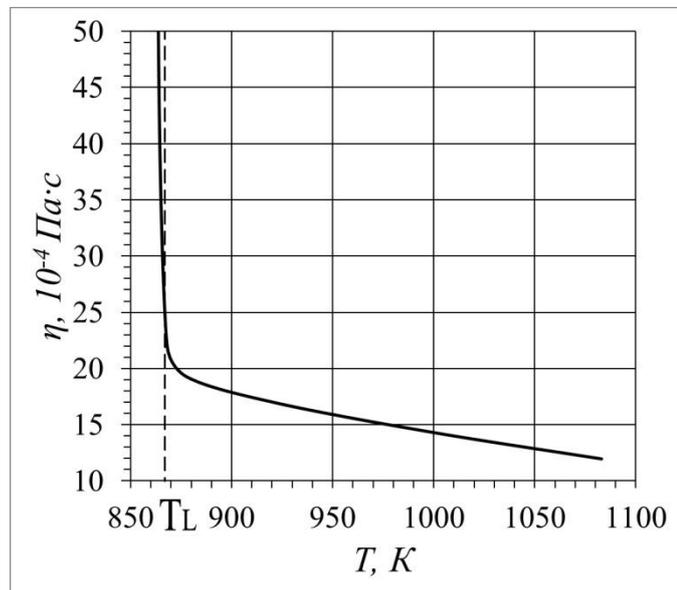


Рисунок 1.19 – Зависимость коэффициента динамической вязкости  $\eta$  от температуры для сплава АК9

Расплавы с неразрушенной структурой обладают не только вязкими, но также упругими и пластическими свойствами [96].

Исследуя поведения расплавов в интервале кристаллизации посредством прибора С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера Л.П. Каширцев установил реологические характеристики некоторых доэвтектических силуминов системы Al-Si (свойства сплава АК9 представлены на рисунках 1.20–1.22).

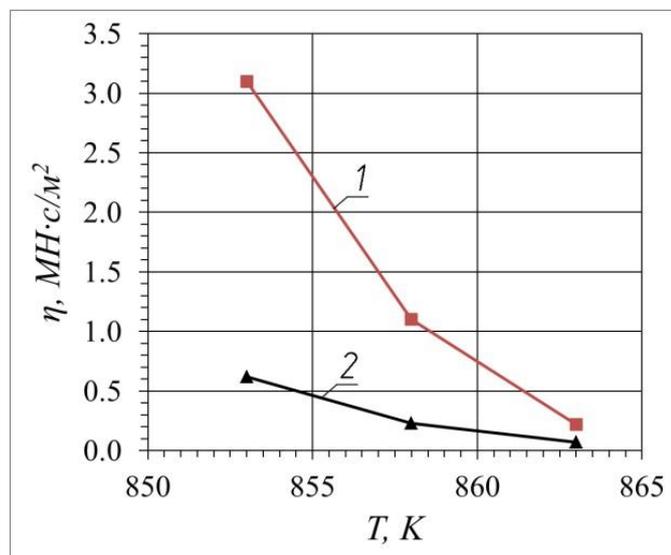


Рисунок 1.20 – Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры: 1– $\eta_1$  [33]; 2– $\eta_2$  [33]

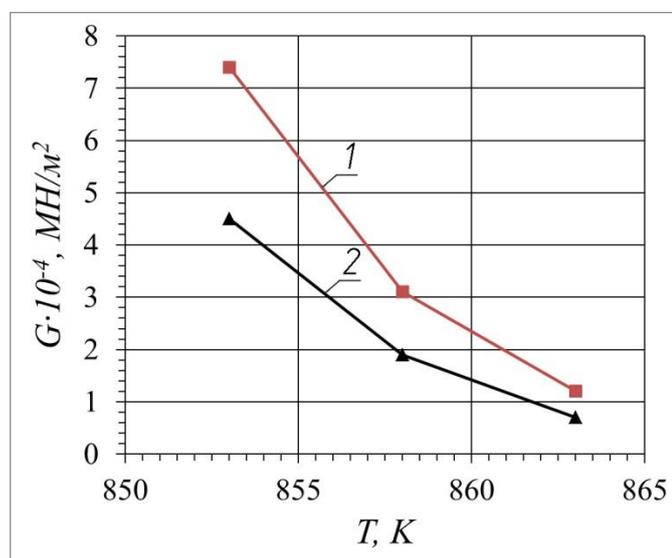


Рисунок 1.21 – Зависимость модуля сдвига  $G_1$  и упругого последействия  $G_2$  от температуры: 1– $G_1$  [33]; 2– $G_2$  [33]

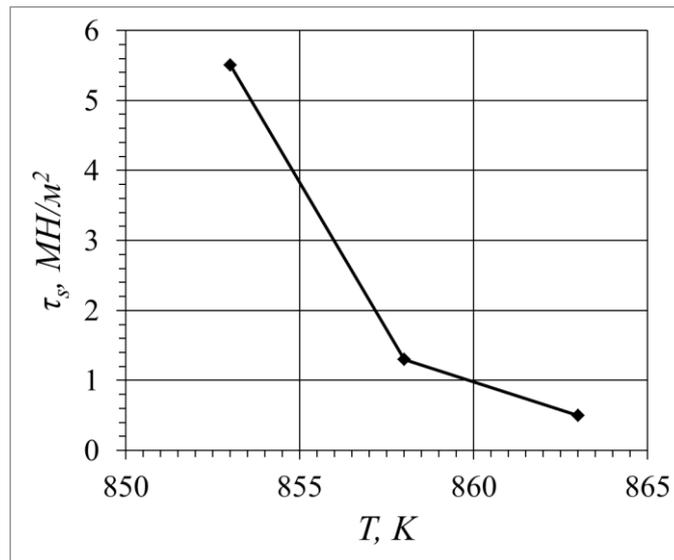


Рисунок 1.22 – Зависимость предельного напряжения сдвига  $\tau_s$  от температуры [33]

Учитывая, что условия проведения эксперимента (однородность температурного поля во всем объеме расплава, его защита от окисления, а также постоянство нагрузки действующей на расплав), отличаются от условий заполнения реальной литейной формы, реологические характеристики расплава в последнем случае, также могут отличаться от полученных в эксперименте.

Модель, описывающая течение расплава со связанной структурой в интервале кристаллизации, предложенная Л.П. Каширцевым [33, 96, 98], приведена на рисунке 1.23.

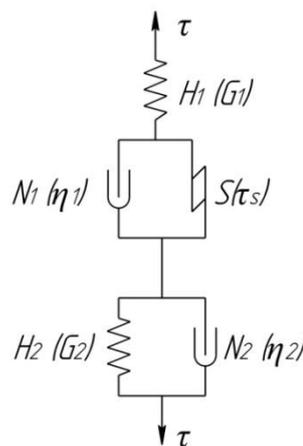


Рисунок 1.23 – Реологическая модель сплава, предложенная Каширцевым Л.П. [33, 96, 98]

Зависимости, позволяющие описывать поведение расплава по этой модели, имеют следующий вид:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left(1 - e^{\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right)}\right), & \text{если } \tau \leq \tau_s \\ \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left(1 - e^{\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right)}\right) + \frac{(\tau - \tau_s)}{\eta_1} t & \text{если } \tau > \tau_s \end{cases}, \text{ при } t_0 < t < t_1$$

$$\gamma = \begin{cases} \frac{\tau}{G_2} \left(1 - e^{\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t_1\right)}\right) \cdot e^{\left(-\frac{G_2}{\eta_2} (t-t_1)\right)}, & \text{если } \tau \leq \tau_s \\ \frac{\tau}{G_2} \left(1 - e^{\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t_1\right)}\right) \cdot e^{\left(-\frac{G_2}{\eta_2} (t-t_1)\right)} + \frac{(\tau - \tau_s)}{\eta_1} t_1 & \text{если } \tau > \tau_s \end{cases}, \text{ при } t > t_1 \quad (1.3)$$

где  $\gamma$ —общая относительная деформация тела;

$\tau$ — приложенное к телу напряжение;

$G_1$ — модуль сдвига;

$G_2$ — модуль упругого последействия;

$\eta_1$ — пластическая вязкость;

$\eta_2$ — псевдовязкость Кельвина;

$\tau_s$ —предельное напряжение сдвига;

$t_0, t_1$ — время приложения и снятия нагрузки, соответственно.

Моделирование поведения расплава в твердожидком состоянии возможно путем применения специализированных компьютерных программ. В программе FLOW 3D учет упруго–вязко–пластических характеристик материала возможен путем использования модели представленной на рисунке 1.24, в которой выполнено параллельное соединение тел Прандтля и Ньютона (модель  $N \mid P$ ).

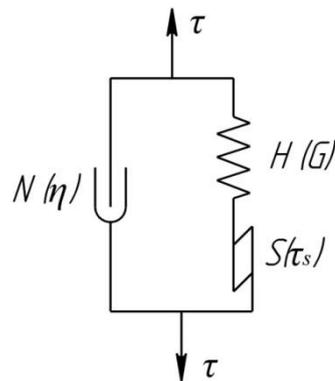


Рисунок 1.24 – Реологическая модель упруго–вязко–пластического тела реализованная в программе FLOW 3D

При  $\tau < \tau_s$  в теле, описываемом такой моделью, возникают упруго–вязкие деформации соответствующие деформации тела Кельвина.

При  $\tau > \tau_s$  поведение модели описывается более сложными математическими выражениями. Для их упрощения приняли следующие допущения: в начальный момент времени деформирование происходит по упруго-вязкому закону, пока напряжения  $\tau_1$ , возникающие в теле Гука, не станут равными  $\tau_s$ ; после того как напряжения превысят  $\tau_s$  дальнейшей деформацией упругого элемента, в виду ее незначительности, пренебрегаем. Это позволяет рассматривать расплав, как вязко–пластическое тело.

С учетом принятых допущений, зависимости, описывающие поведение расплава по модели  $N | P$  (рисунок 1.24) принимают следующий вид:

$$\gamma = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau}{G} \left( 1 - e^{\left( -\frac{G}{\eta} t \right)} \right), \quad \text{если } \tau \leq \tau_s \\ \frac{\tau}{G} \left( 1 - e^{\left( -\frac{G}{\eta} t \right)} \right) \text{ при } t_0 < t < t_2 \\ \frac{\tau_s}{G} + \frac{(\tau - \tau_s)}{\eta} (t - t_2) \text{ при } t_2 < t < t_1 \end{array} \right. \left| \begin{array}{l} \text{если } \tau > \tau_s \end{array} \right. , \text{ при } t_0 < t < t_1$$

$$\gamma = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau}{G} \left( 1 - e^{\left( -\frac{G}{\eta} t_1 \right)} \right) \cdot e^{\left( -\frac{G}{\eta} (t - t_1) \right)}, \quad \text{если } \tau \leq \tau_s \\ \left( \frac{\tau_s}{G} + \frac{(\tau - \tau_s)}{\eta} (t_2 - t_3) \right) e^{\left( -\frac{G}{\eta} (t - t_2) \right)}, \text{ при } t_1 < t < t_3 \\ \frac{(\tau - \tau_s)}{\eta} (t_2 - t_3), \text{ при } t > t_3 \end{array} \right. \left| \begin{array}{l} \text{если } \tau > \tau_s \end{array} \right. , \text{ при } t > t_1$$
(1.4)

где  $G$ – модуль упругого последействия;

$\eta$ – коэффициент динамической вязкости;

$t_1$ – время снятия нагрузки;

$t_2$ – время, при котором  $\tau$  в упругом элементе модели достигает значения  $\tau_s$ ;

$t_3$ – продолжительность релаксации напряжений  $\tau$  в упругом элементе модели.

Подставляя в выражение (1.3) значения реологических характеристик расплава (рисунки 1.20–1.22) соответствующие температуре 863 K, подобрав те же характеристики для выражения (1.4) и сопоставляя полученные результаты (рисунок 1.25 кривые 1 и кривые 2) можно сделать вывод о том, что поведение модели  $N|P$  и модели Каширцева Л.П. имеют близкий характер. При этом вторая пара кривых (рисунок 1.25, б), в большей степени соответствующая по условиям нагружения гравитационной заливке форм, имеет как качественное, так и достаточно высокое количественное совпадение.

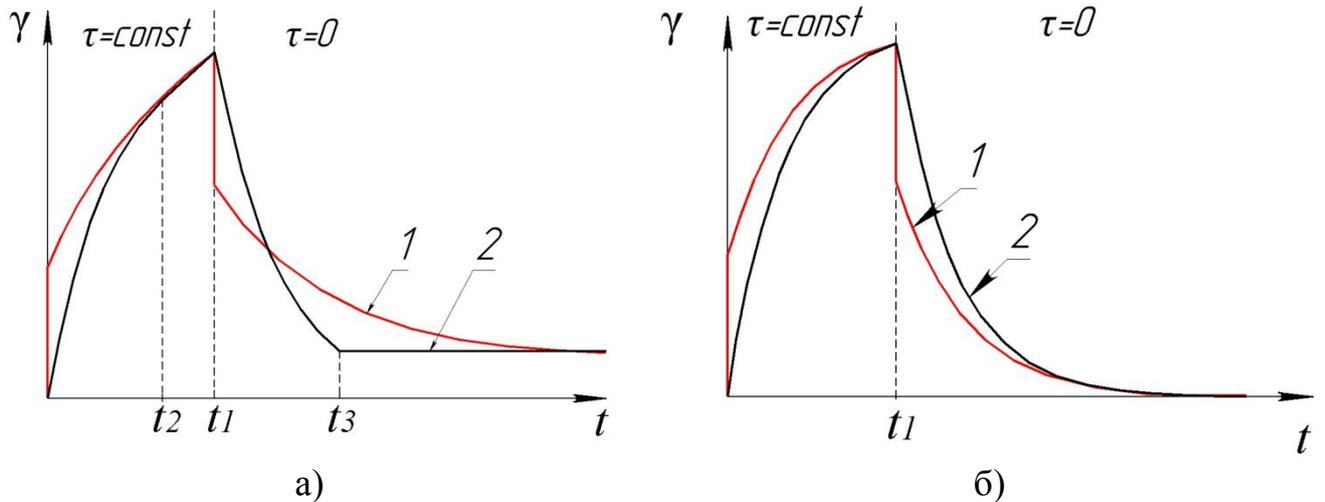


Рисунок 1.25 – Развитие деформации сплава во времени по реологическим моделям Л. П. Каширцева–1 и по модели  $(N|P)$ –2 : а– при  $\tau=0,8 \text{ МПа} > \tau_s$ ; б– при  $\tau=0,3 \text{ МПа} < \tau_s$

### **Выводы по разделу:**

1. Предложенная Л.П. Каширцевым реологическая модель, позволяющая описывать поведение сплава от жидкого до твердого его состояния, требует определения всех реологических характеристик материала, что является технически сложной задачей;
2. Для моделирования поведения расплава в жидком состоянии и на начальном этапе его затвердевания при относительно малых скоростях деформации возможно использование частного случая этой модели, т.е. упруго–вязко–пластической модели  $(N|P)$ ;
3. Полные реологические характеристики сплава АК9 для температур и условий его деформирования, соответствующих гравитационной заливке в рассмотренной литературе отсутствуют. Определение этих характеристик расплава и учет их при численном моделировании процесса заливки кокиля, вероятно, повысит возможности и точность этих расчетов.

## **1.6 Способы оценки содержания в отливках оксидных включений**

Разработке оценочных средств, которые на этапе проектирования позволяли бы определять способность литниковой системы, обеспечивать минимальное содержание оксидных включений в теле отливки посвящены работы многих исследователей.

дователей [26, 36, 99, 100, 101, 42, 102, 45, 103, 104, 93]. Их классификация приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Оценка вероятности загрязнения отливки оксидными включениями

тип	название	автор, источник	критическое значение
критериальная оценка	Число Рейнольдса	Ноткин Е.М., [26]	$Re_{\text{Шпит}} < 5300$ $Re_{\text{Школ}} < 33800$ $Re_{\text{Шст}} < 48300$
		Галдин Н.М., [26]	$Re_{\text{Шпит}} < 7800$ $Re_{\text{Школ}} < 28000$ $Re_{\text{Шст}} < 43500$
	Число Вебера	Кемпбелл Дж., [42]	$We < 1,0$
	Число Фруда	Рейли К., [103]	$Fr < 1,7$
	Критерий $K_{\text{И}}$	Мусяченко А.С., [100]	$K_{\text{И}} < 1600$
	Критерий $K_{\text{Ш}}$	Галдин Н.М. Чистяков В.В., [36]	$K_{\text{Шпит}} < 350 \cdot 10^6$ $K_{\text{Школ}} < 75 \cdot 10^6$ $K_{\text{Шст}} < 1,2 \cdot 10^6$
	Критерий $K_{\text{Ф}}$	Луковников Д.А., [99]	$K_{\text{Ф}} < 1$
способы оценки посредством численного эксперимента	Метод избыточной свободной поверхности	Лай Н., [45]	количественная оценка не предусмотрена
	Метод поверхностного скаляра	Бархударов М. и Хирт К., [101]	количественная оценка не предусмотрена
	Метод OFEM	Рейли К., [93]	количественная оценка не предусмотрена

Так, Н.М. Галдиным [26] были определены максимально допустимые значения чисел Рейнольдса  $Re$  при течении расплава в каналах литниковой системы и рабочей полости формы путем оценки степени загрязненности металла специальной технологической пробы изготовленной в песчаной форме. Джон Кемпбелл, в

качестве критерия оценки степени поверхностного возмущения металла, предложил использовать число Вебера  $We$  [42]. Комплексный критерий  $K_{II}$ , учитывающий как характеристики заливаемого расплава, так и параметры взаимодействия струи с поверхностью формы предложен и обоснован А.С. Мусияченко [100]:

$$K_{II} = K_1 v^2 R_{ПП} \leq 1600, \quad (1.5)$$

где

$K_I$ —коэффициент, учитывающий влияние характеристик расплава, входящих в критерии  $Re$  и  $We$ , а также физико-механические свойства оксидной пленки и шероховатость поверхности формы;

$v$ —скорость расплава;

$R_{ПП}$ — приведенный радиус струи.

В 90-х годах авторы работы [36] предложили другой критерий оценки вероятности образования вторичных шлаков (разрушенных оксидных плен), который учитывает как силы внутреннего трения, так и поверхностное натяжение расплава:

$$K_{III} = \frac{Re_{III} \cdot We_{III} \cdot l_o}{h_n}, \quad (1.6)$$

где

$Re_{III}$  – критическое значение числа Рейнольдса;

$We_{III}$  – критическое значение числа Вебера;

$h_n$  – толщина оксидной пленки на фронте потока;

$l_o$ – характерный размер полости.

Некоторые авторы используют в качестве критерия оценки поверхностных возмущений число Фруда  $Fr$  [103].

В своей диссертации Луковников Д.А. установил критерий  $K_{\Phi}$  для оценки фонтанирования расплава [99]:

$$K_{\Phi} = \frac{1}{\frac{1}{Fr} + \frac{1}{Re} \frac{4D_n H_{nn}}{d_k (D_n - d_k)}}, \quad (1.7)$$

где  $d_k$ – диаметр канала (струи), подводящего поток;

$D_n$ – диаметр вмещающей расплав полости;

$H_{nn}$ – высота предварительного наполнения формы.

В связи с увеличивающимся использованием численного моделирования для принятия конструкторских и технологических решений встал вопрос о разработке критерия количественной оценки процессов происходящих в литейной форме с использованием данного метода. В настоящее время существует несколько способов осуществления такой оценки. Один из них предусматривает определение избыточной площади свободной поверхности возникающей при заполнении формы расплавом путем сравнения фактической площади свободной поверхности с минимально возможной при данных условиях заливки [45] (рисунок 1.26). К недостаткам метода можно отнести трудность определения минимально возможной площади свободной поверхности для фасонной отливки.

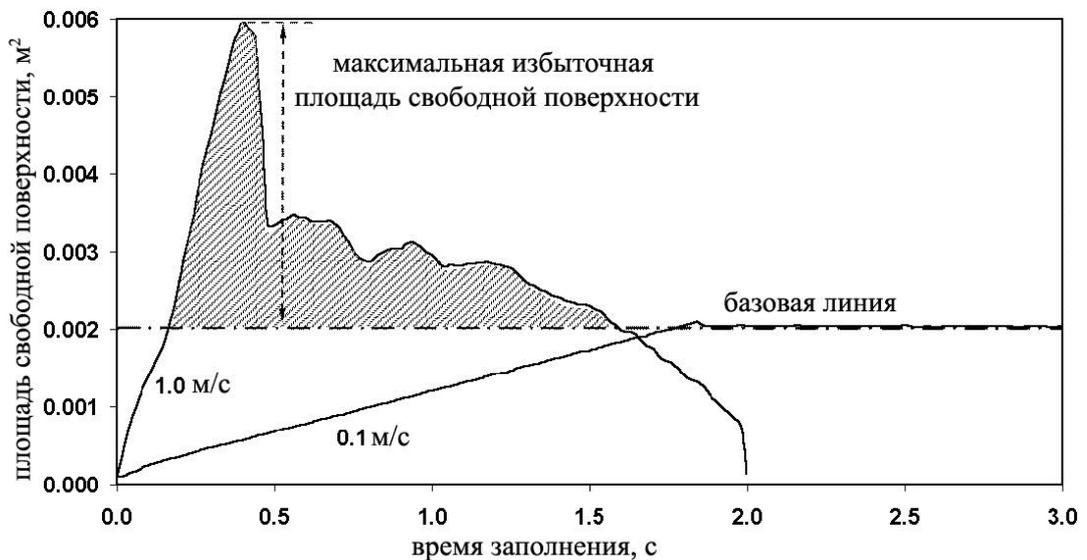


Рисунок 1.26 – Оценка интенсивности течения расплава по избыточной площади свободной поверхности

В другом, на свободной поверхности расплава предусматривается рост оксидной пленки [101]. При использовании данного метода не учитывается объем кислорода находящегося в форме, защитные свойства оксидной пленки, её разрушение, но демонстрируется область возможного скопления дефектов, особенно на стыке потоков. В модели OFEM [93] частицы, генерируемые на свободной по-

верхности с определенным интервалом, перемещаются вместе с движущимся расплавом. Если две частицы соприкасаются, считается, что в результате образования волны, произошел захват оксидной пленки. Далее происходит отслеживание положения захваченной частицы и таким образом можно прогнозировать распределение разрушенных оксидных плен в теле отливки. К недостаткам данного метода можно отнести длительность расчета и ограниченность информации о максимально возможном содержании оксидных плен в литой детали или ее нагруженных частях.

***Выводы по разделу:***

1. Существующие методики оценки вероятной загрязненности материала отливки оксидными включениями, по результатам численных экспериментов, можно разделить на косвенные (критериальные) и методы прямого численного моделирования процесса образования и распределения оксидов по материалу;
2. Недостатки существующих косвенных методов обусловлены сложностью определения критериев для каналов и полостей со сложной конфигурацией, а также тем, что они не дают информации о вероятном распределении оксидов по объему отливки;
3. Численные методы частично устраняют эти недостатки, но не дают возможности произвести количественную оценку степени поражения отливки продуктами окисления. Кроме этого они требуют значительных вычислительных ресурсов.

## Выводы по главе 1

1. Оксиды в виде плен и их фрагментов, образующиеся в рабочей полости формы во время ее заполнения расплавом, могут оказывать существенное негативное влияние на механические свойства отливок из алюминиевых сплавов;
2. В зависимости от условий протекания реакции окисления (температуры расплава, его химического состава, парциального давления  $O_2$ , длительности контакта расплава с атмосферой формы и других факторов) толщина образующейся в форме пленки может изменяться в достаточно широких пределах;
3. Для снижения вероятности перераспределения оксидных включений по объему отливки необходимо уменьшать скорость восходящих потоков при заполнении формообразующей полости;
4. Реологические характеристики сплава АК9 для условий гравитационной заливки в литературе представлены не в полной мере. Определение этих параметров позволит более точно воспроизводить процесс заполнения формы расплавом посредством численного моделирования;
5. Дополнительные исследования особенностей окисления алюминиевых сплавов в литейной форме позволят расширить номенклатуру отливок изготавливаемых с использованием верхних литниковых систем.

Из представленных выводов по разделам и в целом по первой главе вытекает цель данной работы: повышение механических свойств отливок из алюминиевых сплавов изготавливаемых литьем в кокиль путем разработки рекомендаций по проектированию литниковых систем, обеспечивающих уменьшение оксидных включений в отливках.

Для реализации данной цели в работе поставлены следующие основные задачи исследований:

–разработать критерий оценки вероятной степени загрязненности отливки оксидными включениями при использовании численного моделирования. И показать возможности его применения;

–установить реологические характеристики сплава АК9 определяющие поведение расплава в формообразующей полости при ее гравитационном заполнении;

–исследовать особенности процесса окисления расплава в газонепроницаемой оснастке при использовании нижнего и верхнего подвода и предложить элементы литниковой системы и другие решения, способствующие уменьшению содержания оксидных плен и их фрагментов в теле отливки или ее наиболее ответственных частях.

## **2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОТЛИВКАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЛАВА**

Как было отмечено в разделе 1.6, существующие методы оценки степени вероятного поражения отливки оксидными включениями обладают рядом недостатков, ограничивающих возможность их использования при численном моделировании процессов изготовления литых деталей и заготовок. В связи с этим задачей дальнейшего исследования стала разработка такой методики, которая бы отвечала на вопросы о вероятном количестве оксидов, образующихся при заполнении формы, а также об их распределении по материалу отливки. Вместе с этим, такая методика не должна быть определяющей при выборе вычислительных ресурсов.

Очевидно, что решение задач, связанных с заполнением литейных форм, включая вопросы по образованию оксидов в отливках из алюминиевых сплавов, невозможно без использования соответствующей реологической модели и сведений о реологических свойствах расплава. В разделе 1.5 выполнено предварительное обоснование выбора модели для численного моделирования процесса заливки литейных форм, а также обращено внимание на отсутствие в литературных источниках некоторых реологических характеристик для конкретных сплавов, например, для АК9. Это поставило задачу разработки методики определения таких свойств, для выбранной модели, описывающей поведение расплава в кокиле при его гравитационной заливке.

## 2.1 Критериальная оценка содержания в отливках оксидов путем численного моделирования процесса

Одним из возможных способов, позволяющих учесть отмеченные недостатки существующих критериальных методик, является разработка критерия, служащего мерой количества оксидов, которые могут образовываться вследствие окисления алюминиевого сплава при заполнении формообразующей полости кокиля.

### 2.1.1 Сущность критерия

В качестве инструмента для оценки загрязненности отливки оксидами предлагается критерий  $K_{OF}$ , значение которого определяется следующей зависимостью:

$$K_{OF} = \frac{V_{SR}}{V_o} \cdot k_T \cdot k_K, \quad (2.1)$$

где  $V_{SR}$ —объем оксидов, образующихся при заполнении формы;

$V_o$ — объем отливки;

$k_T$ — коэффициент, учитывающий температуру заливки расплава;

$k_K$ — коэффициент, учитывающий компонентный состав сплава.

Объем  $V_{SR}$  оксидов рассчитывается по следующей зависимости:

$$V_{SR} = F_{SRi} \cdot h_p, \quad (2.2)$$

где  $F_{SRi} = \frac{\int_0^{t_{зан}} F_{SR}(t) dt}{t_{зан}}$  — среднеинтегральная площадь свободной поверхности

расплава,

$F_{SR}$ — текущая площадь свободной поверхности расплава;

$t_{зан}$ — продолжительность заполнения формы;

$h_p$ — средняя толщина оксидной пленки, образующаяся на поверхности  $F_{SR}$ .

Зависимость коэффициента  $k_T$  от температуры установили, используя статистическую обработку результатов работы Шмитца К. [71] (рисунок 1.13а) с применением стандартного пакета анализа данных в программе MS Excel и принимая  $k_T=1,0$  при  $T_{зан}=1033$  К  $k_T=1$  (рисунок 2.1):

$$\begin{cases} K_T = 0,0017T - 0,7561, \text{ при } T \leq 1047\text{K}, \\ K_T = 0,0449T - 46,019, \text{ при } T > 1047\text{K} \end{cases} \quad (2.3)$$

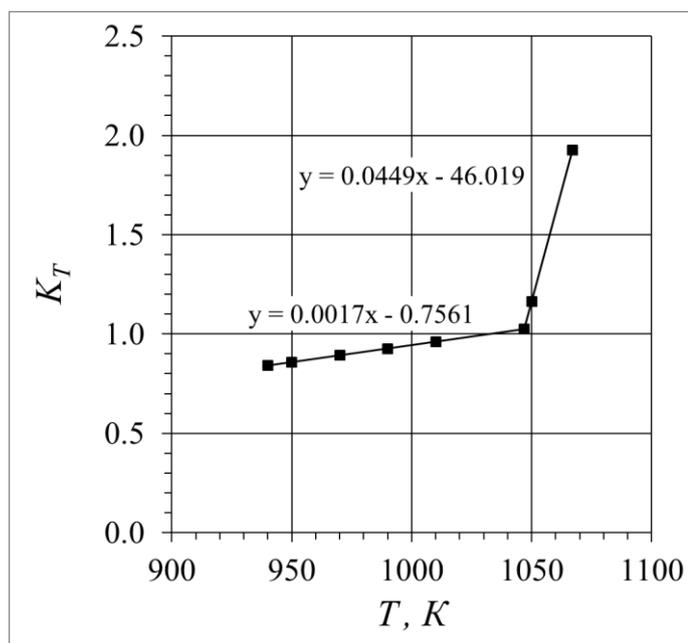


Рисунок 2.1 – Зависимость коэффициента  $k_T$  от температуры

Значения коэффициента  $k_K$ , учитывающего компонентный состав сплава (таблица 2.1) определяли путем анализа данных работ [60, 72] о влиянии легирующих компонентов на процесс окисления (рисунок 1.13б).

Таблица 2.1 – Значения коэффициента  $k_K$

Коэффициент	Без легирующих компонентов	Содержание Mg в сплаве		
		0%	0,25...0,35%	≥1,0%
$k_K$	0,01	0,005...2,5	1,0	2,5

Кинетика изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности расплава (рисунок 2.2) определяется при моделировании заполнения формы (рисунок 2.3) с помощью программ FLOW 3D или ProCAST.

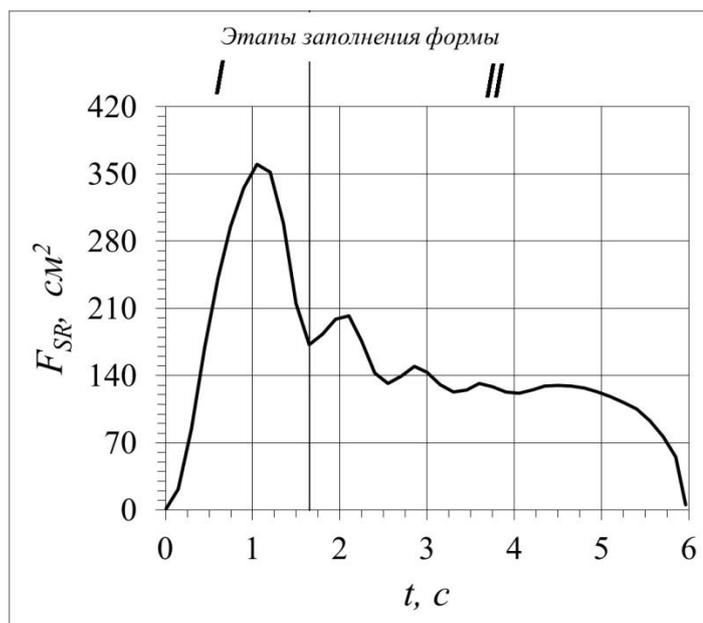


Рисунок 2.2 – Кинетика изменения свободной поверхности расплава при заливке формы: I – начальный возмущенный этап заполнения; II – этап установившегося заполнения



Рисунок 2.3 – Результат моделирования процесса заполнения формы: а–I этап; б–II этап

Заполнение формы может происходить при сильном возмущении расплава (рисунок 2.3 а), когда оксидные пленки, образующиеся на поверхности, разрушаются, а обновленная свободная поверхность вновь подвергается окислению. При спокойном же заполнении формы (рисунок 2.3 б), отклонение  $F_{SR}$  свободной поверхности от минимально возможной незначительны и такое движение потока практически не приводит к нарушению сплошности оксидной пленки, препятствующей дальнейшему окислению расплава. Исключение составляют алюминиевые сплавы имеющие в своем составе, например,  $Mg$ , который приводит к образованию на такой поверхности рыхлой проницаемой для  $O_2$  пленки шпинели [60],

имеющей в своем теоретическом составе  $MgO$  — 28,34 и  $Al_2O_3$  — 71,66%. К таким материалам относится и сплав АК9.

Программы, позволяющие осуществлять численное моделирование литейных процессов не дают возможности учета вновь возникающей свободной поверхности потока, поэтому для оценки объема оксидов, образующихся при заполнении формы, в формуле (2.2) используется ее среднеинтегральное значение. Площадь  $F_{SRi}$  может быть определена последовательно для любого, интересующего этапа заполнения формы и тем самым осуществить прогноз по распределению оксидов по объему отливки.

### 2.1.2 Результаты экспериментов

Оценка возможности применения предлагаемого критерия  $K_{OF}$  осуществлялась путем сравнения результатов натуральных экспериментов, выполненных М.В. Шаровым и Н.М. Галдиным [41], с результатами численных экспериментов. На рисунке 2.4 представлен эскиз заливаемой пробы.

Авторы работ [26, 41] определяли закономерности влияния на загрязненность оксидными включениями отливки, выполненной из сплава АЛ4, каждого элемента литниковой системы. В качестве переменной в этих закономерностях выступали значения чисел  $Re$  Рейнольдса для каждого канала. На первом этапе ими изучалась система, состоящая из формообразующей полости и стояка (рисунок 2.5), затем к «лучшему» стояку добавляли коллектор и варьировали его параметрами. К «лучшей» из последних систем добавляли питатели и устанавливали закономерность влияния числа  $Re_{пит}$  в питателе на загрязненность пробы.

Для сравнительного анализа результатов натуральных и численных экспериментов (с оценкой загрязненности отливки с помощью критерия  $K_{OF}$ ) моделирование процесса заполнения осуществлялось на пробе с простой литниковой системой, состоящей только из стояка с высотой  $h_{ст}=var$  (рисунок 2.5).

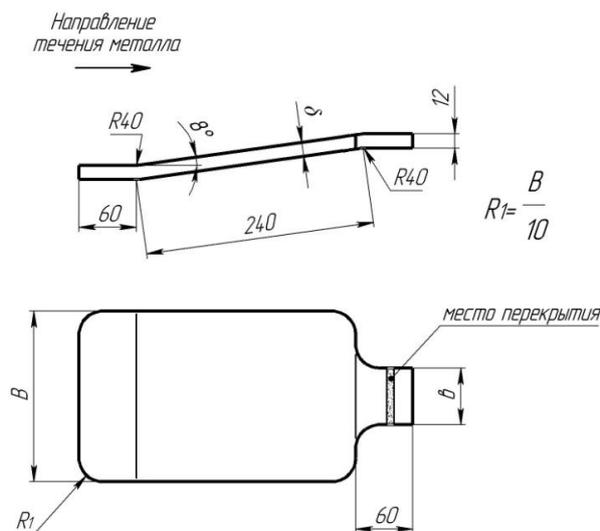


Рисунок 2.4 – Эскиз контрольной пробы [41]

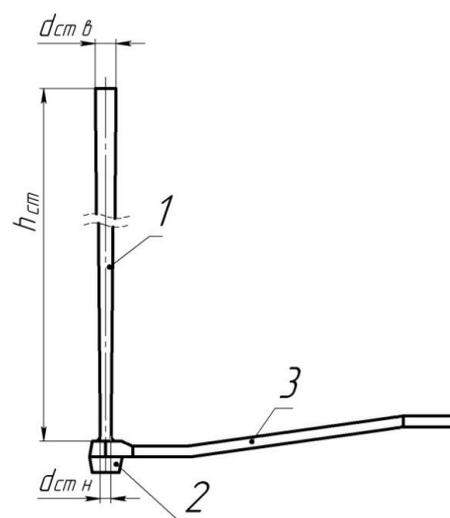


Рисунок 2.5 – Эскиз системы для исследования режимов течения металла:  
1–стояк; 2–зуппф; 3– контрольная проба;  $d_{ст.в}$ ,  $d_{ст.н}$ ,  $h_{ст}$ – диаметр верхнего и нижнего поперечного сечения стояка и его высота, соответственно

При выполнении расчетов использовались свойства сплава АК9 (А360), температура заливки расплава, как и в натуральных экспериментах, принималась равной 760 °С, а скорость течения расплава в верхнем сечении стояка во всех опытах имела значение 1,17 м/с. Последнее соответствует значению скорости при уровне расплава в литниковой чаше 70 мм. В натуральных экспериментах также обеспечивалось постоянство уровня расплава в чаше, а заполнение формы начиналось только после полного ее заполнения и подъема, запирающей стояк, пробки [41]. Однако его численное значение в рассмотренных работах авторов методики не приводится. Результаты исследований представлены на рисунке 2.6.

Режим течения расплава в форме в работе [41] оценивался исходя из загрязнения отливки оксидными включениями путем определения отношения суммарной площади проекций включений, выявленных рентгеноскопией к общей площади рабочей части пробы. В случае численного моделирования оценка производилась по разработанному критерию  $K_{OF}$ , при этом толщина оксидной пленки  $h_p$ , на основании результатов литературного обзора (раздел 1.2) принималась равной 5 мкм.

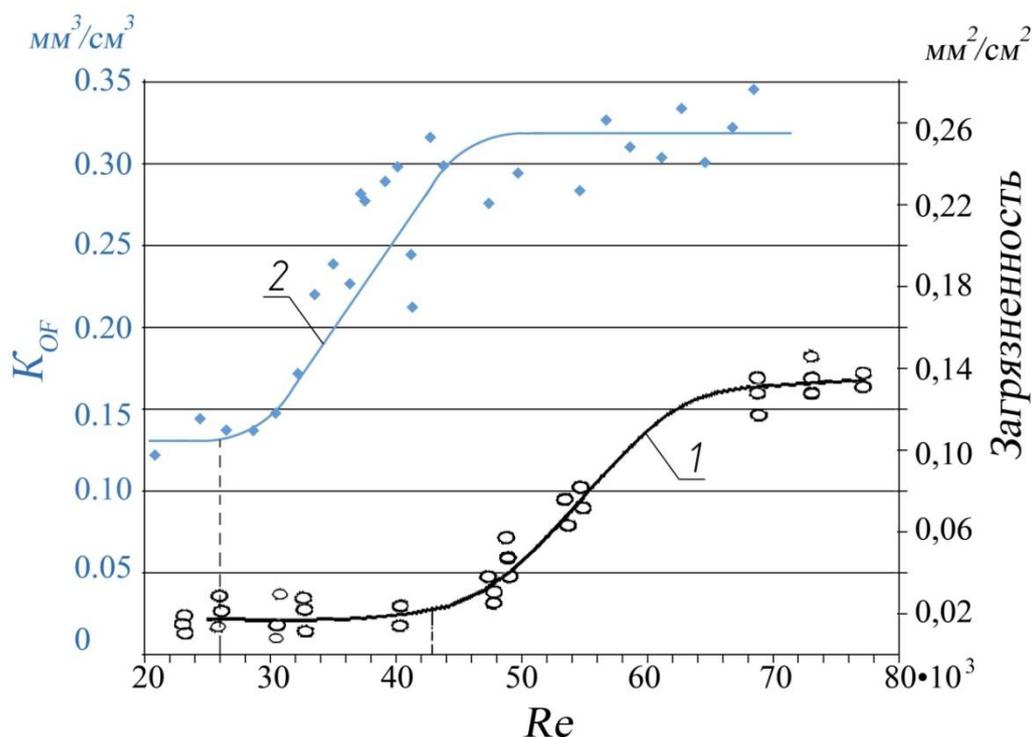


Рисунок 2.6 – Результаты исследований заполнения формы посредством стояка: 1 – натурный эксперимент [26, 41]; 2 – численный эксперимент.

Результаты численного моделирования качественно совпадают с результатами натурального эксперимента.

Возможность сравнения объемных долей загрязнений (численный эксперимент) с долями площади, занятой оксидами (натурный эксперимент) вытекает из теории вероятности [105] и данных работы [106]. Согласно которым:

$$n_{OK} F_{OK} = L_{OK} V_{OK}, \quad (2.4)$$

где  $n_{OK}$  – количество оксидных плен на единичной площади, шт;

$F_{OK}$  – средняя площадь оксидных плен,  $\text{см}^2$ ;

$L_{OK}$  – число оксидных плен в единичном объеме, шт;

$V_{OK}$  – средний объем оксидов в единичном объеме,  $\text{см}^3$ .

Количественное расхождение (критическое значение числа  $Re$  при натурном эксперименте – 43500, а при численном – 26000) можно объяснить, прежде всего тем, что в натуральных экспериментах, после полного заполнения пробы, формообразующая полость промывалась дополнительным объемом расплава. Назначение этого приема приведено в работах [26, 41]. Кроме этого, вероятным неполным со-

ответствием геометрии модели технологической пробы, использованной в численном эксперименте и пробы описанной в работе [41]. Это предположение вытекает из данных работы [100], где экспериментально проверено и утверждается, что используемые в практике литья алюминиевых сплавов критические значения числа Рейнольдса в стояке (43500) завышены и не должны превышать 6500...24000. Вместе с этим следует отметить, что геометрия пробы в последнем случае была другая, как и отливки, изготавливаемые на практике, могут иметь различную геометрию.

***Выводы по разделу:***

1. Для оценки загрязненности отливок оксидными пленами посредством результатов численного моделирования процесса заполнения кокилей может быть использован критерий  $K_{OF}$ .

2. Возможность использования разработанного критерия  $K_{OF}$  подтверждена сравнительным анализом результатов численного моделирования с экспериментальными данными натуральных исследований, а также их обсуждением на международной конференции [107].

3. Для оценки объема оксидов, образующихся при заполнении песчаной газопроницаемой формы с использованием нижней литниковой системы, средняя толщина оксидной пленки  $h_p$  может быть принята равной 5 мкм.

## **2.2 Оценка вероятного объема оксида алюминия, образующегося в формообразующей полости кокиля**

Количество окислителя в металлической газонепроницаемой оснастке ограничено, кроме того парциальное давление кислорода при заполнении формы расплавом постоянно снижается. В связи с этим, количество оксидных включений образующихся во время заполнения кокиля ниже, чем при использовании разовой песчаной формы.

Для определения количества оксида алюминия, образующегося из единицы объема воздуха в металлической газонепроницаемой оснастке, были приняты следующие допущения:

- в рабочей полости содержится только воздух при температуре формы (573K) и в реакции окисления принимает участие весь его начальный объем (отсутствует подсос воздуха, он не покидает форму через вентиляционную систему и другие элементы формы, соединяющие формообразующую полость кокиля с атмосферой);

- окислительные процессы на поверхности расплава происходят только между  $Al$  и  $O_2$ , содержащимися в форме (не учитываются другие кислородосодержащие вещества и окисляемые компоненты расплава), по формуле  $4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3$ .

Согласно химической реакции [108]:

$$\frac{n_{O_2}}{n_{Al_2O_3}} = \frac{3}{2}, \quad (2.5)$$

где

$n_{Al_2O_3}$ -число молей оксида алюминия;

$n_{O_2}$ -число молей кислорода

Тогда:

$$n_{Al_2O_3} = \frac{2}{3} \cdot n_{O_2}, \quad (2.6)$$

Число молей каждого вещества определяется по следующим зависимостям [108]:

$$n_{Al_2O_3} = \frac{m_{Al_2O_3}}{M_{Al_2O_3}}, \quad (2.7)$$

$$n_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{MO_2}}, \quad (2.8)$$

где

$m_{Al_2O_3}$ —масса оксида алюминия;

$M_{Al_2O_3}$ — молярная масса оксида алюминия ( $M_{Al_2O_3} = 102 \frac{г}{моль}$ );

$V_{O_2}$ —объем кислорода вступившего во взаимодействие с расплавом;

$V_{MO_2}$ — молярный объем кислорода.

С учетом (2.6)–(2.8) формула для определения массы оксида будет иметь следующий вид:

$$m_{Al_2O_3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_{O_2}}{V_{MO_2}} \cdot M_{Al_2O_3} \quad (2.9)$$

Для того, чтобы определить молярный объем кислорода  $V_{MO_2}$  при температуре  $T=573$  К (температура воздуха в нагретом кокиле) воспользовались законом Гей-Люссака [108]:

$$V/T = const, \text{ т.е.} \quad (2.10)$$

$$\frac{V_{MO_2}}{T} = \frac{V'_{MO_2}}{T'}, \text{ где} \quad (2.11)$$

$V'_{MO_2}$ —молярный объем кислорода при нормальных условиях ( $T'=273,15$  К;  $p'=101,3$  кПа), который в соответствии с законом Авогадро составляет  $V'_{MO_2}=22,4$  л/моль.

Выразив из (2.11) молярный объем кислорода  $V_{MO_2}$ , получили:

$$V_{MO_2} = \frac{V'_{MO_2} T}{T'} = \frac{22,4 \cdot 573}{273,15} = 46,99 \text{ л/моль}$$

Нашли массу оксида, образующуюся из  $1 \text{ см}^3$  воздуха содержащегося в форме. При этом, учитывая, что в воздухе содержится 21%  $O_2$ , приняли  $V_{O_2}=0,00021 \text{ см}^3$ :

$$m_{Al_2O_3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,00021}{46,99 \cdot 1000} \cdot 102 = 3,039 \cdot 10^{-4} \text{ г}$$

Согласно [13, 109] во время заполнения формы на поверхности алюминиевого расплава образуется  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , плотность которого  $\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}=3,64 \text{ г/см}^3$  [110]. Тогда:

$$V_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{m_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{3,039 \cdot 10^{-4}}{3,64} = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$$

В результате получили, что  $1 \text{ см}^3$  объема рабочей полости формы при контакте с расплавом может образовать до  $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ , то есть объем менее 0,01% от объема отливки. Вместе с тем, в зависимости от условий протекания окислительных процессов (температура, химический состав сплава, скорость обновления свободной поверхности расплава в форме и др.) толщина оксидной пленки может изменяться от 0,1 [76] до 5 мкм [36, 52], при этом площадь ее поверхности будет составлять от 833,0 до 16,7  $\text{см}^2$ , соответственно. Очевидно, что наличие окислов с такой поверхностью в материале отливки может оказывать существенное влияние на условия питания ее затвердевающих частей.

#### ***Выводы по разделу:***

1. Оценка вероятного объема оксидов образующихся в рабочей полости формы при ее заполнении, с учетом принятых допущениях показала, что  $1 \text{ см}^3$  воздуха в форме при контакте с расплавом может образовать до  $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ .
2. Наличие в материале отливки оксидных плен небольшого объема, но имеющих развитую поверхность, может оказывать существенное влияние на условия питания ее затвердевающих частей и способствовать образованию и развитию дефектов усадочного происхождения.

### **2.3 Определение реологических характеристик расплава в интервале кристаллизации**

Как уже отмечалось, при течении расплава в интервале кристаллизации с уменьшением температуры помимо вязкости увеличивается влияние упругих и

пластических свойств. В тоже время реологические характеристики сплава зависят не только от температуры, но и от состояния его структуры, то есть от того какое разрушение она претерпела в той или иной области движущегося потока. Так, если структура полностью разрушена, у сплава проявляются в основном только вязкие свойства, а если она не разрушена, то расплав обладает всем набором реологических характеристик. Заметим, что все это может наблюдаться при одной и той же температуре расплава [98].

При этом, зависимость вязкости сплава АК9 от температуры была определена в первой главе и представлена на рисунке 1.19. С учетом результатов, полученных в разделе 1.5, можно допустить, что модуль упругого последействия в интервале кристаллизации, до образования связанной структуры, соответствует модулю упругого последействия  $G_2$  [98], определенному Л.П. Каширцевым. Зависимость этой характеристики от температуры для сплава АК9 показана на рисунке 2.7.

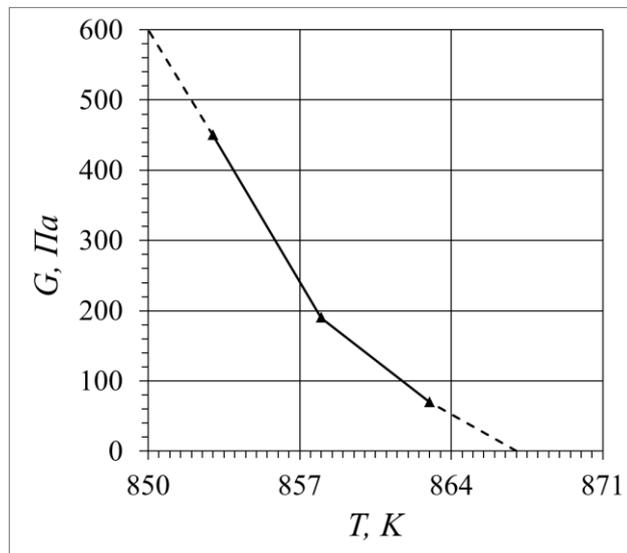


Рисунок 2.7 – Зависимость модуля  $G$  упругого последействия сплава АК9 от температуры

Принимая во внимание отмеченное, а также возможности программы FLOW 3D, не учитывающей степень разрушения структуры расплава, задачей дальнейшего исследования являлась разработка методики, позволяющей оцени-

вать усредненное, учитывающее степень разрушения структуры расплава при его гравитационной заливке в кокиль, предельное напряжение сдвига  $\tau_s$ .

Значение предельного напряжения сдвига  $\tau_s$  устанавливали путем проведения численных экспериментов по заливке металлической формы для получения проб жидкотекучести [111]. Для этой цели использовали программу FLOW 3D. При заполнении такой формы, как известно [98], проявляются все реологические свойства расплава. Так, например, в работе [112] численное моделирование в пакете ProCAST использовалось для изучения влияния добавок небольшого количества кальция на жидкотекучесть магниевых сплавов типа МЛ5. Для корректировки данных по его вязкости использовались свойства сплава, рассчитанные по термодинамической базе этой программы, что позволило авторам получить результаты моделирования сопоставимые с натурными экспериментами.

Вместе с тем, многолетнее использование этой пробы (первые пробы такого вида появились еще в 1920-е гг.) как у нас в стране, так и за рубежом, показывает достаточно точное прогнозирование успешного заполнения формы для фасонных отливок. ГОСТ 16438-70 предусматривает для этой цели использование песчано-глинистых сырых и сухих форм, а также кокилей.

Конструкция металлической формы для получения проб жидкотекучести металлов (ГОСТ 16438-70) представлена на рисунке 2.8.

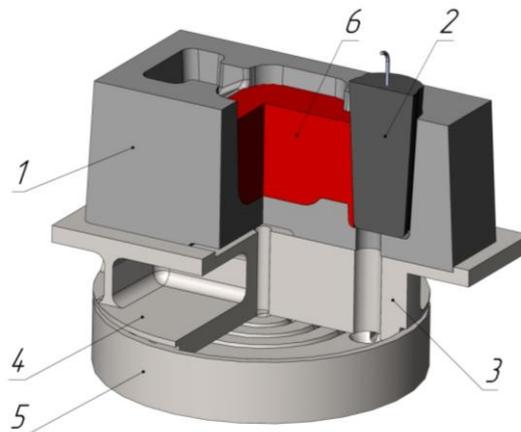


Рисунок 2.8 – Конструкция металлической формы для получения проб жидкотекучести металлов по ГОСТ 16438-70 (3D – модель): 1–литниковая чаша; 2–стопор; 3,4– левая и правая часть верхней полуформы соответственно; 5–нижняя полуформа; 6– расплав.

Согласно методике проведения экспериментов по ГОСТ 16438-70 расплав заливают в чашу до уровня порога и при значении температуры на 10% превышающей температуру  $T_L$  ликвидуса, производят заполнение спирального измерительного канала путем резкого поднятия стопора 2 (рисунок 2.8).

При моделировании учитывались теплофизические свойства материалов деталей формы, а именно для литниковой чаши свойства песчано-глинистой смеси, а для деталей верхней и нижней полуформы свойства углеродистой стали. Теплофизические параметры огнеупорного покрытия на поверхностях металлических частей, контактирующих с расплавом, принимались соответствующими кокильной краске с теплопроводностью  $0,452 \text{ Вт/(мК)}$  и толщиной  $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Начальная температура формы была принята равной  $373 \text{ К}$ , температура заливки расплава  $973 \text{ К}$ .

Известно, что пластические свойства в расплаве начинают проявляться не сразу после снижения температуры ниже температуры ликвидуса, а лишь при достижении некоторого ее критического значения [40]. Приняли допущение, что эта критическая температура соответствует 15% доли твердой фазы.

Концентрацию твердой фазы  $\psi$  в сплаве АК9 в интервале кристаллизации можно оценить по следующей формуле, учитывающей данные работы [34]:

$$\psi = \frac{T_L - T}{T_L - T_E} (1 - \psi_E), \quad (2.12)$$

где  $\psi$ —доля твердой фазы;

$\psi_E$ — доля эвтектики в расплаве;

Графическое отображение зависимости (2.1) представлено на рисунке 2.9 (кривая 1).

В программе ProCAST также можно получить изменение количества твердой фазы в интервале кристаллизации для сплава AC 44400AlSi9, имеющего близкий состав к сплаву АК 9 (кривая 2). Учитывая, что у сплава AC 44400AlSi9 более широкий интервал кристаллизации этот график был скорректирован (кривая 3) с учетом зависимости (2.12) и данных работ [113, 114]. Полученная таким

образом зависимость  $\psi$  от температуры использовалась при моделировании процесса в программе FLOW 3D.

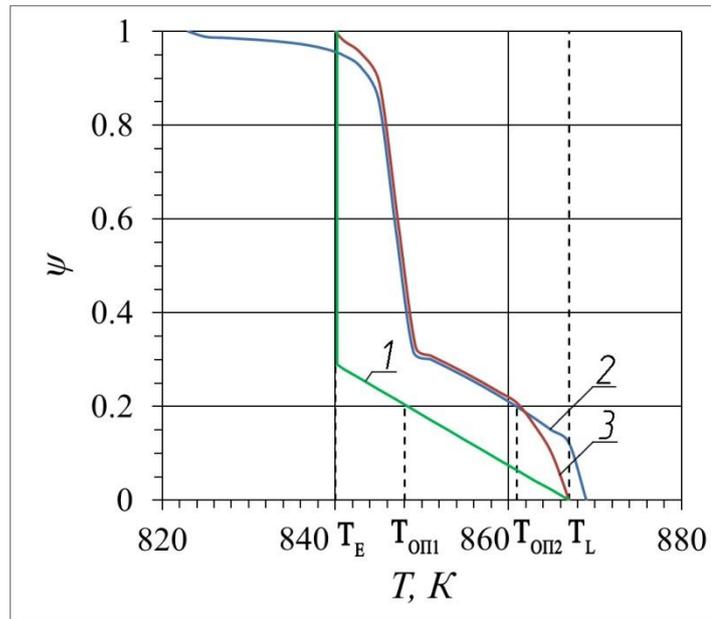


Рисунок 2.9 –Зависимость количества твердой фазы  $\psi$  от температуры для сплава АК9: 1–по выражению (2.12); 2–данные программы ProCast для сплава АС 44400AlSi9; 3– скорректированная зависимость под сплав АК9

Из рисунка 2.9 (кривая 3) следует, что 15-ти % доли твердой фазы соответствует температура  $T_{\psi=15}=590^{\circ}\text{C}$  (863 K)

Предельное напряжение сдвига  $\tau_s$  сплава от  $T_{зал}$  до  $T_{\psi=15}$  имеют значения близкие к нулевым. Далее значение этого параметра возрастает и при температуре  $T_{оп}$  достигнет значения, при котором усилия создаваемого напором не достаточно для его преодоления. Известно, что это происходит при 20% доли твердой фазы в расплаве [33, 98], что соответствует температуре  $588^{\circ}\text{C}$  (861 K). Примем, что в интервале от  $T_{\psi=15}$  до температуры остановки потока  $T_{оп}$  изменение  $\tau_s$  носит линейный характер (рисунок 2.10). Его значение при  $T_{оп}$  можно определить исходя из условия, что остановка сплава АК9 в спиральной пробе на жидкотекучесть при заливке в кокиль происходит на длине 800 мм [13].

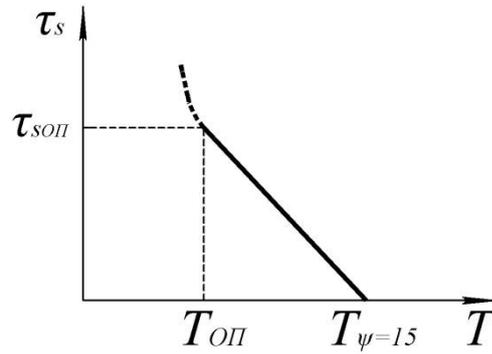


Рисунок 2.10 – Зависимость предельного напряжения сдвига  $\tau_s$  от температуры для сплава АК9, где  $\tau_{сop}$  – предельное напряжение сдвига при температуре  $T_{оп}$  остановки потока

Теплофизические свойства сплава АК9 используемые для данного исследования представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Теплофизические свойства сплава АК9 [33, 36]

$T_E, K$	$T_L, K$	$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$c_1, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$c_2, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}^3$	$\lambda_1, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$S_{эф}$ кДж/кг
840	867	2200	2500	1274	1077	83	104	457

Обработка результатов производилась следующим образом. В сечениях А-А и Б-Б спиральной пробы (рисунок 2.11) фиксировалось максимальное значение скорости на носике потока по средней линии О-О (рисунок 2.12).

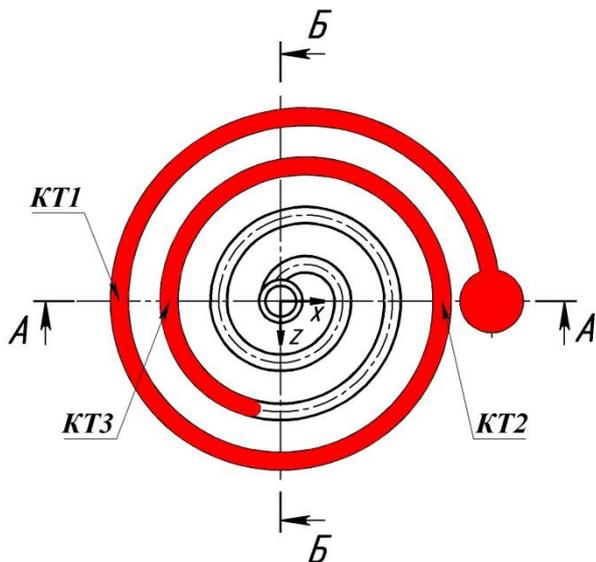


Рисунок 2.11 – Схема замера скорости течения расплава

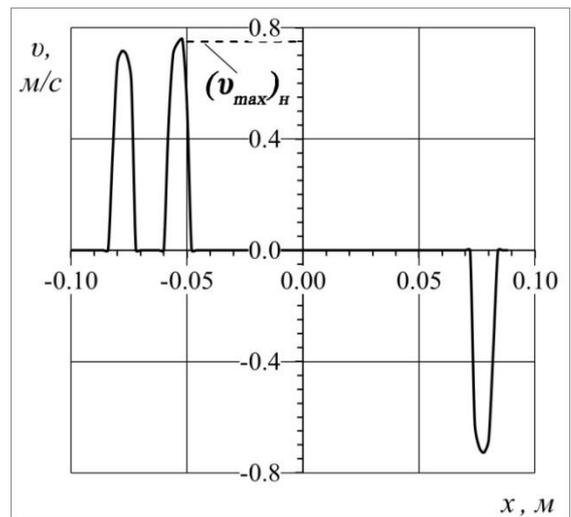


Рисунок 2.12 – Распределение скорости расплава в сечении А-А измерительного участка пробы

Затем было получено распределение скорости по длине заливаемой пробы (рисунок 2.13).

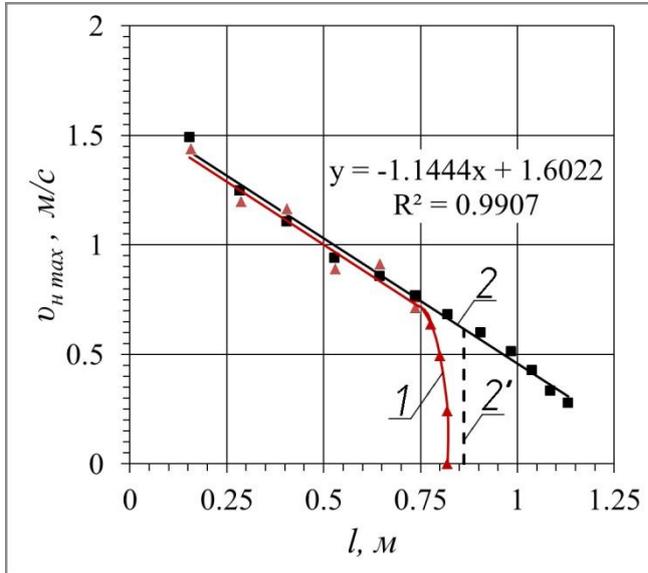


Рисунок 2.13 – Изменение скорости  $v_{n \max}$  на носике потока по мере заполнения пробы на жидкотекучесть: 1– по упруго-вязкопластической модели; 2– по модели с переменной вязкостью; 2' – остановка потока при 20% содержании твердой фазы;  $l$  – текущая длина заполненного канала

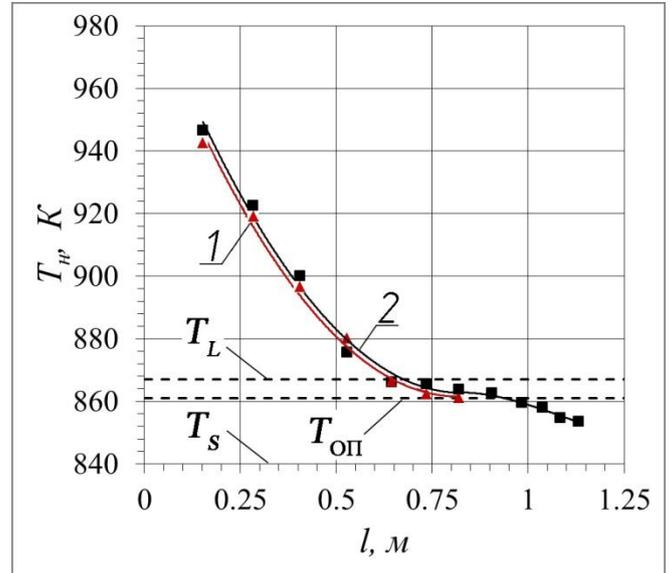


Рисунок 2.14 – Изменение температуры  $T_n$  на носике потока при заполнении пробы на жидкотекучесть: 1–по упруго-вязкопластической модели; 2– по модели с переменной вязкостью

Как видно из рисунка 2.14, снятие перегрева расплава происходит на длине  $\sim 640$  мм. На длине  $\sim 735$  мм начинают проявляться пластические свойства расплава, что снижает скорость его продвижения по измерительному каналу спиральной пробы (рисунок 2.13, кривая 1). Методом подбора было установлено значение предельного напряжения сдвига  $\tau_s$  при температуре  $T_{оп}$  ( $\tau_{соп} = 200$  Па), при котором остановка потока происходила на длине  $\sim 800$  мм.

Численные эксперименты показали, что использование упруго-вязкопластической модели требует значительных вычислительных ресурсов. Продолжительность расчетов по сравнению с расчетами, выполненными с использованием модели с переменной, зависящей от текущей температуры расплава вязкостью, может увеличиться в  $\sim 3$  раза. Для снижения требуемых ресурсов, влияние упруго-пластических характеристик расплава заменили, предусмотренной в

программе FLOW 3D, принудительной остановкой потока при достижении на носике потока 20% концентрации твердой фазы (рисунок 2.13, кривая 2' (пунктирная линия)).

Для сравнительного анализа на рисунке 2.15 представлено изменение скорости  $v$  расплава в контрольных точках измерительного канала КТ1, КТ2 и КТ3 (рисунок 2.11).

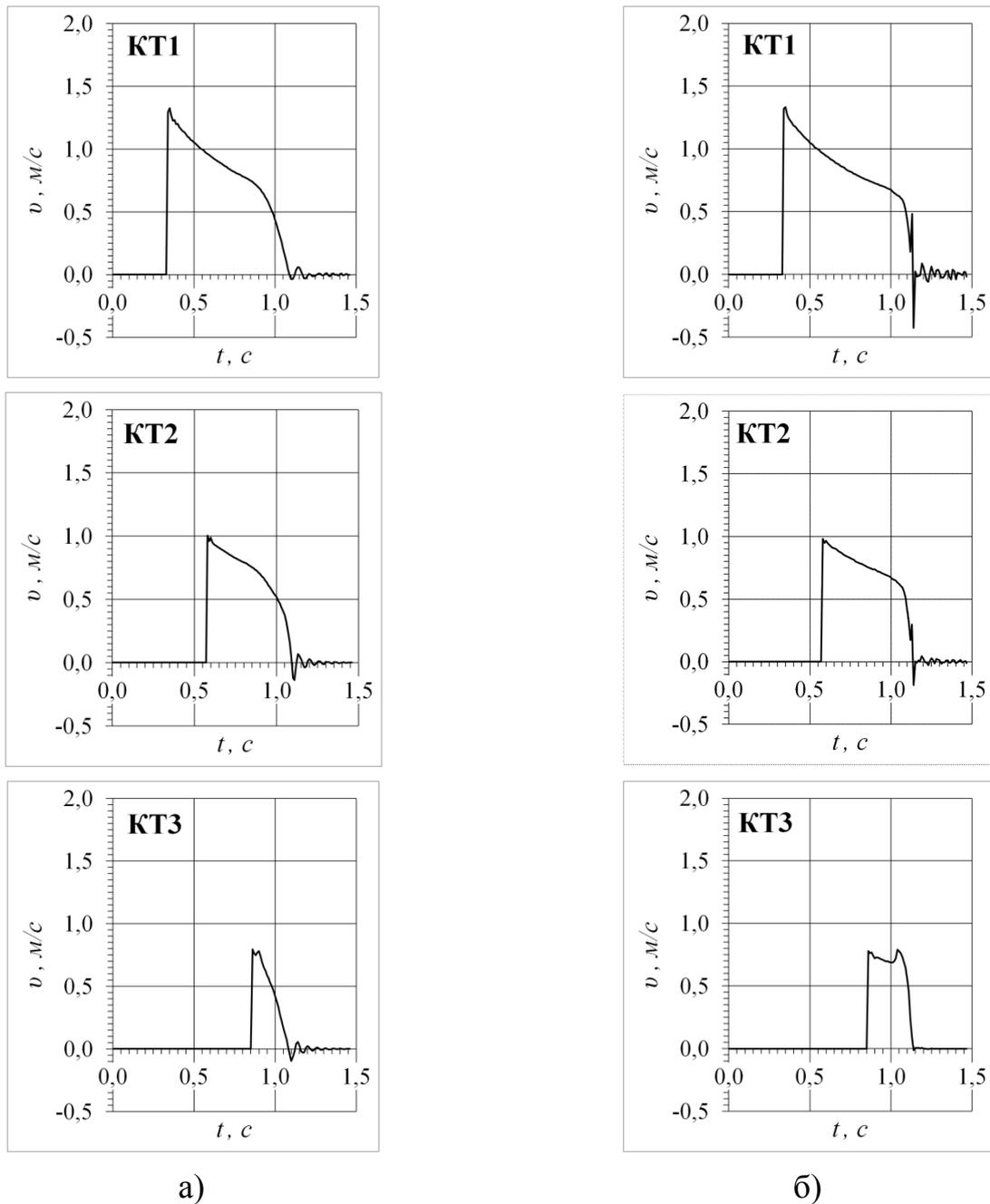


Рисунок 2.15 –Изменение скорости расплава в контрольных точках при заполнении пробы: а–по упруго-вязкопластической модели; б – по модели с переменной вязкостью

Путем наложения соответствующих кривых (рисунок 2.16) установлено, что существенные отличия в этих зависимостях наблюдаются при завершении формирования пробы, то есть при температуре расплава на носике ниже  $T_L$ . Из чего следует, что при решении задач, связанных с заполнением формы для фасонных отливок, использование второй модели может приводить к существенным погрешностям.

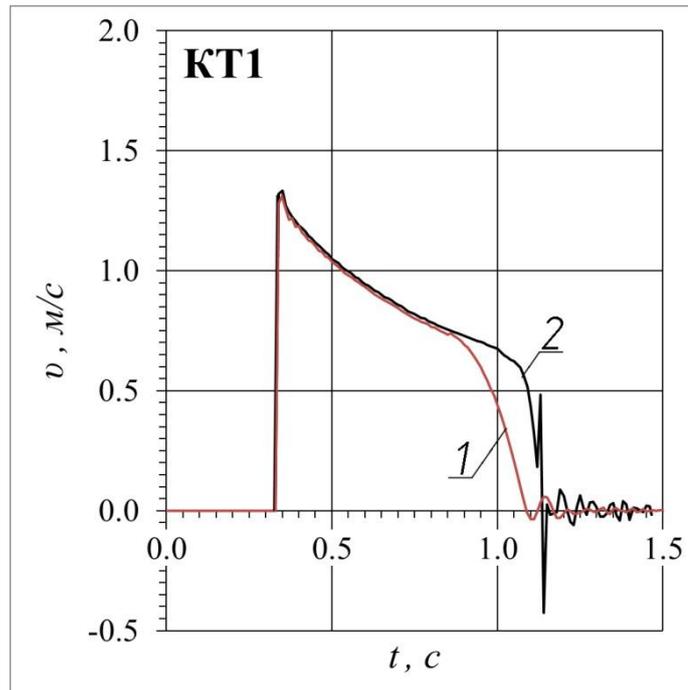


Рисунок 2.16 –Изменение скорости расплава в контрольной точке КТ1 при заполнении пробы: 1–по упруго-вязкопластической модели; 2– по модели с переменной вязкостью

***Выводы по разделу:***

1. Численным моделированием заполнения пробы на жидкотекучесть установлено значение предельного напряжения сдвига  $\tau_s$  сплава АК 9, при котором происходит остановка потока ( $\tau_{\text{сон}} = 200$  Па).

2. Возможность использование модели расплава с переменной, зависящей от температуры вязкостью, предусматривающее остановку потока при 20% доле твердой фазы при моделировании процесса заполнения фасонных отливок требует дополнительной проверки.

## Выводы по главе 2

1. Предложен критерий  $K_{OF}$  оценки степени загрязненности отливки оксидными пленами при использовании численного моделирования. Возможность использования этого критерия подтверждена сравнительным анализом результатов численного моделирования с экспериментальными данными натурных исследований, представленных в работах [26, 100, 41].

2. Оценка вероятного объема оксидов образующихся в рабочей полости формы при ее заполнении при принятых допущениях показала, что  $1 \text{ см}^3$  воздуха при контакте с расплавом может образовать до  $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ .

3. Наличие в материале отливки оксидных плен небольшого объема, но имеющих развитую поверхность, может оказывать существенное влияние на условия питания ее затвердевающих частей и способствовать образованию и развитию дефектов усадочного происхождения.

4. Разработана методика оценки реологических свойств металлических расплавов в их интервале кристаллизации и имеющих структуру близкую к разрушенной путем заливки стандартной пробы на жидкотекучесть и сопоставления результатов численных и натурных экспериментов.

5. Путем использования данной методики установлено значение предельного напряжения сдвига сплава АК 9, при котором происходит остановка потока ( $\tau_{\text{сop}} = 200 \text{ Па}$ ) в кокиле для получения пробы жидкотекучести.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ ОТЛИВКИ ОКСИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

#### 3.1 Зависимость загрязненности отливки оксидными включениями от температуры заливки расплава в форму

Установлено (раздел 1.2), что с увеличением температуры расплава скорость его окисления увеличивается на всех этапах технологического процесса, при этом количественные сведения в основном касаются подготовительных операций [78, 71]. Следует так же отметить, что окисление алюминиевых сплавов в печах протекает, чаще всего, при постоянной площади невозмущенной свободной поверхности. При заполнении же рабочей полости литейной формы даже для простых отливок, свободная поверхность расплава постоянно обновляется. При известных режимах поступления расплава в форму возможно его фонтанирование, разбрызгивание, возмущение свободной поверхности. При повышении температуры расплава и снижении его вязкости степень этих возмущений может только увеличиваться, что должно приводить к повышению загрязненности отливки оксидами.

Для установления закономерности влияния температуры  $T_{зал}$  заливки расплава на загрязненность отливки (на значение критерия  $K_{OF}$ ) численные эксперименты проводили с использованием пробы М.В. Шарова и Н.М.Галдина (рисунки 2.4 и 2.5) и моделей расплава, учитывающих его различные характеристики. При этом в качестве исходного варианта ( $T_{зал}=760^{\circ}\text{C}$ ) был выбран вариант расчета, выполненный при  $Re=37540 > Re_{кр}$  (рисунок 2.6). Температура ликвидуса  $T_L$  сплава АК9 составляет 867 К. Численное моделирование производили изменяя температуру заливки  $T_{зал}$  в диапазоне от 873К до 1050К, при этом учитывались реологические характеристики сплава, установленные во второй главе.

Как уже отмечалось, вязкость алюминиевых сплавов увеличивается с уменьшением температуры, а существенное изменение этой характеристики происходит перед началом кристаллизации расплава и дальнейшем снижении температуры. Известно и подтверждено в работе, что при этом уменьшается вероятность его струйного течения и растекания в формообразующей полости литейной формы. На рисунке 3.1 показано это влияние вязкости на площадь  $F_{SR}$  его свободной поверхности, подвергаемой окислению в форме (рисунок 3.1 кривые 1 и 2), путем изменения температуры  $T_{ЗАЛ}$  заливки расплава.

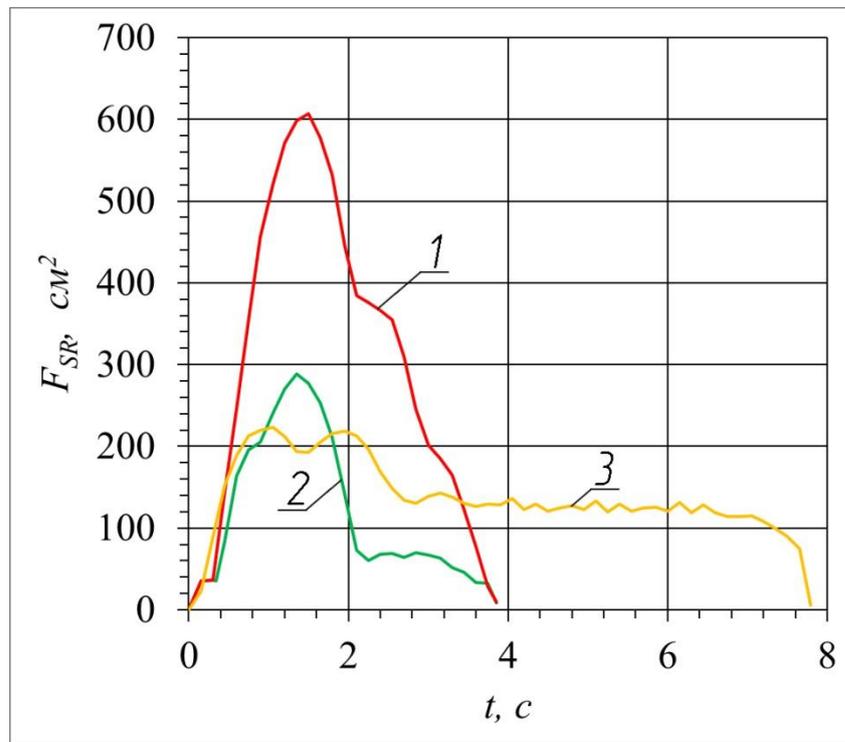


Рисунок 3.1 – Кинетика изменения свободной поверхности расплава при заливке формы: 1 –  $T_{ЗАЛ} = 1030$  К ( $Re = 37540 > Re_{КР}$ ,  $h_{СТ} = 500$  мм); 2 –  $T_{ЗАЛ} = 873$  К ( $Re = 21470$ ,  $h_{СТ} = 500$  мм); 3 –  $T_{ЗАЛ} = 1030$  К ( $Re = 20760 < Re_{КР}$ ,  $h_{СТ} = 50$  мм)

Для сравнения на этом же рисунке показана кинетика изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности (кривая 3) при температуре заливки  $T_{ЗАЛ} = 1030$  К, но при другой расходной характеристике стояка ( $Re = 20760 < Re_{КР}$ ). Данный режим не приводит к значительным возмущениям расплава, в связи с чем, установившаяся площадь  $F_{SR}$ , образующуюся во время заполнения, можно принять за минимальную для исследуемой отливки. Заметим, что эта площадь совпадает с геометрической площадью горизонтального сечения контрольного участка пробы.

Из рисунка 3.1 видно, что максимальное значение площади  $F_{SR}$  (кривая 2) на ~20% больше чем у кривой 3, характеризующей поведение расплава при минимальных возмущениях. Объяснить это можно меньшим значением числа  $Re$  в третьем варианте расчета. Вместе с этим, на завершающем этапе заполнения картина меняется на противоположную. В отличие от заливки перегретого расплава (рисунок 3.2, а, в), по мере заполнения пробы расплавом с меньшим перегревом температура на носике потока приближается к температуре  $T_{ОП}$  остановки потока (рисунок 3.2, б). При этом, в результате увеличения пластических свойств, расплав становится менее подвижным, особенно в его пристеночных слоях, что приводит к уменьшению площади  $F_{SR}$  сводной поверхности до значений ниже минимальных. В рассматриваемом примере расчета она меньше геометрической площади сечения на ~40% (рисунок 3.1, кривые 2, 3).

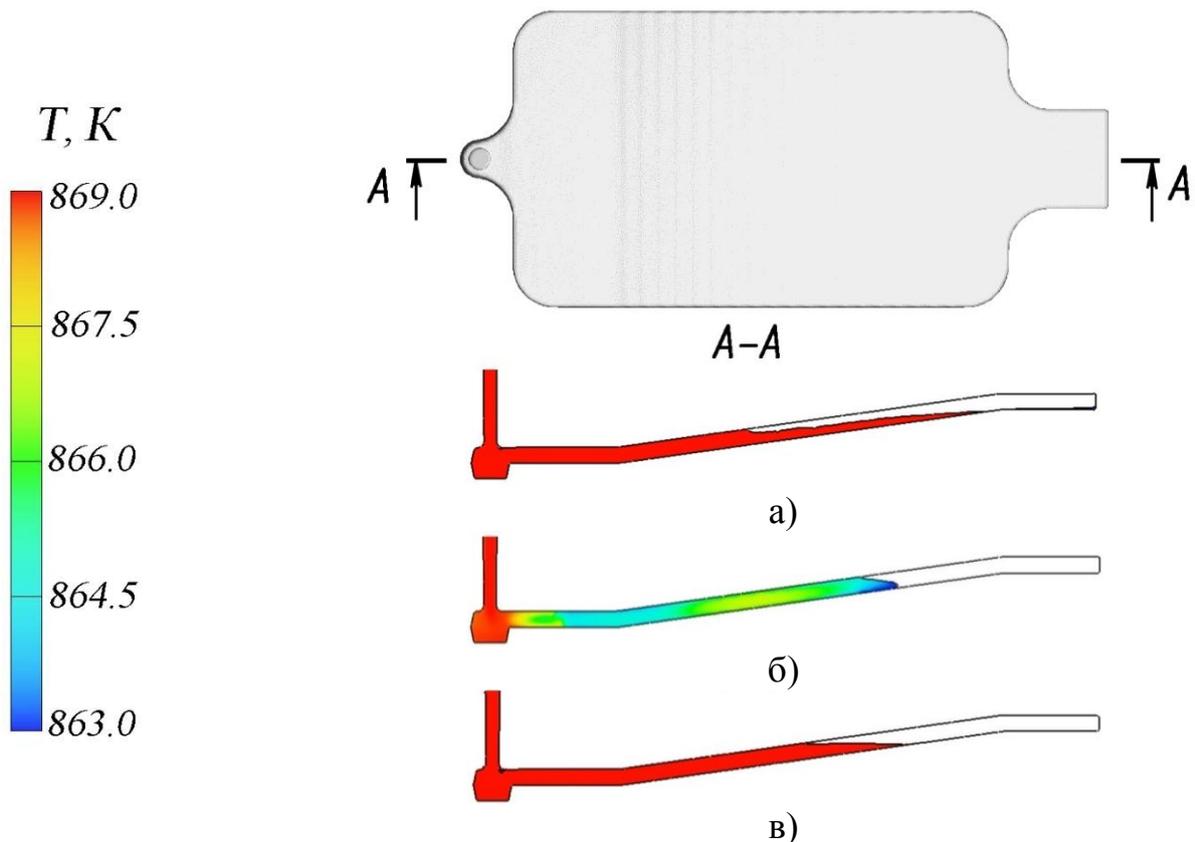


Рисунок 3.2 – Поведение расплава в форме при разных начальных условиях: а-  $T_{ЗАЛ} = 1030 K (Re > Re_{КР})$ ; б-  $T_{ЗАЛ} = 873 K (Re > Re_{КР})$ ; в-  $T_{ЗАЛ} = 1030 K (Re < Re_{КР})$

После обработки результатов всех экспериментов в программе Excel, были получены зависимости  $K_{OF}$  от температуры заливки расплава (рисунок 3.3). При этом моделирование осуществлялось с учетом:

- всех реологических характеристик ( $\eta=f(T)$ ,  $\tau_s=f(T)$ ,  $G=f(T)$  – зависимостей коэффициента динамической вязкости, предельного напряжения сдвига и модуля упругого последействия от температуры, кривая 1);
- изменения вязкости  $\eta=f(T)$  расплава с изменением его температуры во время заполнения формы, кривая 2;
- значения вязкости  $\eta = \eta_{const}$ , соответствующего вязкости перегретого сплава и задаваемого программой FLOW 3D автоматически (рисунок 3.3, кривая 3).

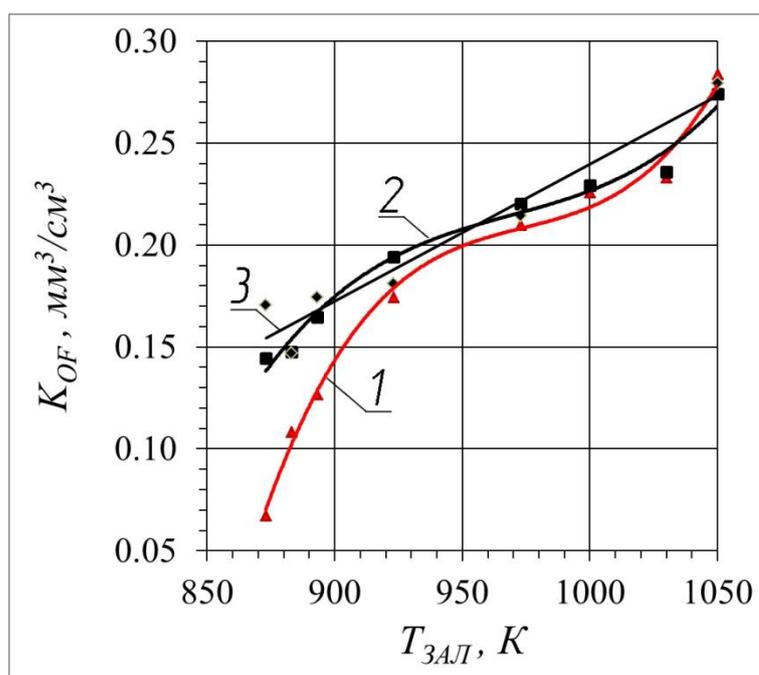


Рисунок 3.3 – Зависимость степени загрязненности материала отливки ( $K_{OF}$ ) от температуры  $T_{ЗАЛ}$  заливки расплава: 1 – по упруго-вязкопластической модели (критерий Пирсона  $R^2=0,99$ ); 2 – по модели с переменной, зависящей от текущей температуры вязкостью  $\eta=f(T)$  ( $R^2=0,98$ ); 3 – по модели с постоянной вязкостью  $\eta=const$  ( $R^2=0,94$ )

Результаты, полученные по упруго-вязкопластической модели, в большей степени соответствуют физическим представлениям о поведении расплава в форме при температуре ниже температуры  $T_L$  ликвидуса. С изменением температуры

$T_{ЗАЛ}$  заливки от 873К до 973К количество оксидных включений в отливке увеличивается, что связано с уменьшением вязкости расплава. Дальнейшее увеличение температуры приводит к увеличению содержания включений, что вызвано более интенсивным протеканием окислительных процессов:

$$K_{OF} = 1,43 \cdot 10^{-7} \cdot T_{ЗАЛ}^3 - 30467,0739 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ЗАЛ}^2 + 2969,7302 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ЗАЛ} - 96,384 \quad (3.1)$$

Установленная связь является статистически значимой, так как значение коэффициента корреляции Пирсона  $R^2 = 0,99$ .

Заметим, что эти результаты согласуются с практическими данными по изменению механических свойств кокильных отливок из сплава АК7ч [31]. В этой работе отмечается рост предела прочности на ~25%, а пластичности образцов для механических испытаний на разрыв, полученных литьем в кокиль, более чем в 3 раза, при снижении температуры заливки расплава с 950 до 900К. Авторы также обращают внимание на то, что существуют условия, при которых будет происходить «...непрерывное повышение уровня механических свойств литого металла по мере снижения температуры заливки расплава...». К таким условиям они относят приложение внешнего давления.

Использование других моделей (рисунок 3.3, кривые 2, 3) при температуре заливки расплава ниже ~950К дает результаты, существенно отличающиеся от предыдущих и имеющих меньшую достоверность при их оценке с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Наиболее близкие результаты получены с использованием модели расплава с переменной, зависящей от температуры вязкостью (рисунок 3.3, кривая 2).

#### ***Вывод по разделу:***

1. Снижение вероятности загрязнения отливки оксидными включениями возможно путем уменьшения температуры расплава перед его заливкой в форму. Этот вывод не противоречит известному правилу «Плавь горячо, а лей холодно», широко используемому на практике технологическому приему литья, на который не раз обращал внимание Г.Ф. Баландин [33, 34, 115]. Вместе с тем, изменение условий протекания окислительных процессов путем использования такого прие-

ма ограничено повышением вероятности появления у отливок таких дефектов, как недолив, неслитина, спай и других, обусловленных недостаточной жидкотекучестью расплава.

2. Для сокращения продолжительности численных экспериментов модель расплава с переменной, зависящей от его температуры, вязкостью может быть использована при условии, когда кристаллизация отливки начинается после полного заполнения рабочей полости формы. Такие условия, чаще всего выполняются в литейных технологиях, предусматривающих гравитационную заливку формы (литье в песчаные и керамические формы, литье в кокиль и др.).

### **3.2 Влияние положения отливки в форме на значение критерия $K_{OF}$**

Известно, что положение отливки в форме может оказывать существенное влияние на характер ее заполнения. Так, если в начальный период формируется «болото», то при этом могут создаваться условия для последовательного спокойного заполнения формообразующей полости расплавом. Примером такого заполнения может служить заполнение пробы М.В. Шарова и Н.М.Галдина через стояк при докритических (43500 – натурный [41]; 26000 – численный эксперимент, раздел 2.1.2) значениях числа Рейнольдса.

Для ответа на основной вопрос данного раздела, о влиянии положения отливки в форме на ее загрязненность оксидами, в геометрию этой пробы внесли изменение, касающееся значения угла  $\alpha = \text{var}$  (Рисунок 3.4) наклона ее контрольного участка (в пробе М.В. Шарова и Н.М.Галдина  $\alpha = 8^\circ$ , Рисунок 2.4).

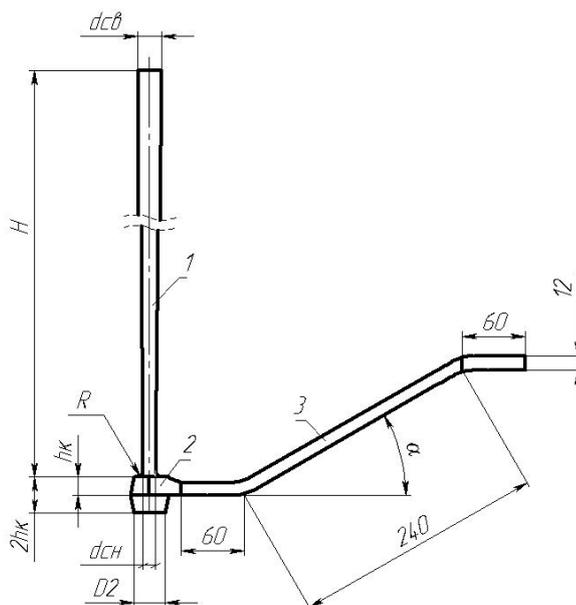


Рисунок 3.4 – Эскиз системы для исследования влияния положения формообразующей полости на загрязненность отливки оксидными включениями: 1–стояк; 2–зумпф; 3– отливка

Несмотря на простую геометрию, положение формообразующей полости во время заполнения может оказывать существенное влияние на количество образующихся оксидных включений и соответственно на качество готового изделия. Это обусловлено особенностями поведения потока расплава в формообразующей полости при разных углах наклона  $\alpha$ . При его изменении также меняются значения минимально возможной площади свободной поверхности, которую можно определить из горизонтального сечения отливки. Так, если при угле  $\alpha = 0^\circ$  значение этого параметра составляет  $(F_{SR})_{\min} = 573 \text{ см}^2$ , то при  $90^\circ$   $(F_{SR})_{\min} = 18 \text{ см}^2$ .

При проведении численного моделирования скоростной режим заполнения формы соответствовал  $Re = 37540 > Re_{KP}$ , а температура заливки расплава 1030K (рисунок 2.6), угол наклона отливки  $\alpha$  варьировали от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Результат обработки экспериментов в программе Excel представлен на рисунке 3.5.

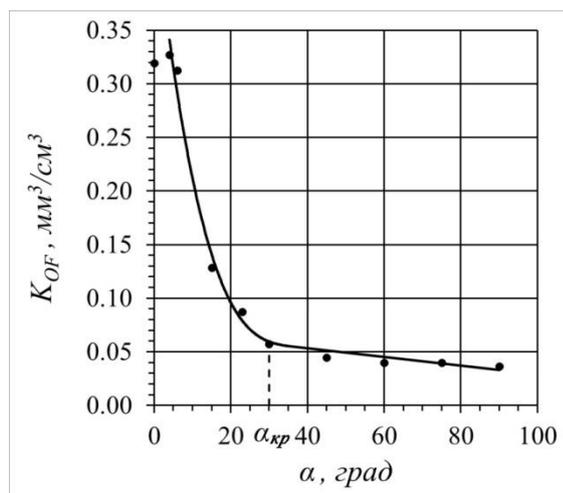


Рисунок 3.5 –Зависимость степени загрязненности расплава от угла наклона  $\alpha$  отливки в форме

Из рисунка 3.5 видно, что с уменьшением угла наклона количество оксидных включений в форме, оцененное посредством критерия  $K_{OF}$ , растёт и резко увеличивается при уменьшении величины угла ниже критического значения ( $\alpha_{кр}=30^\circ$ ).

Для сравнительного анализа влияния положения отливки в форме на вероятность ее загрязнения оксидами было установлено влияние скоростного режима заполнения формы на степень загрязненности ( $K_{OF}$ ) при разных значениях угла наклона  $\alpha$  контрольного участка пробы М.В. Шарова и Н.М. Галдина (рисунок 3.6).

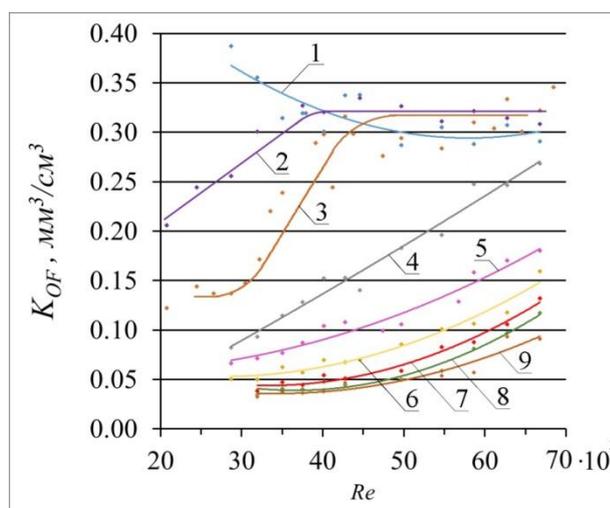


Рисунок 3.6 –Влияние скоростных параметров заполнения формы на степень загрязненности расплава оксидными включениями при углах наклона отливки  $\alpha$ : 1 –0°; 2 –4°; 3–8°; 4–15°; 5–23°; 6–30°; 7–45°; 8–60°; 9–90°

Как видно из полученных зависимостей (рисунок 3.6) при горизонтальном расположении формообразующей полости (кривая 1) получение литой нагруженной детали с ограничениями по содержанию оксидных включений, без принятия дополнительных технологических мер (фильтрация расплава и др.), весьма затруднительно, а, чаще всего, невозможно. Длительность заполнения формы при максимальной площади свободной возмущенной поверхности, при таком варианте расположения, может приводить к высоким показателям загрязненности отливки  $K_{OF} > 0,3 \text{ мм}^3/\text{см}^3$ .

По сравнению с горизонтальным расположением угол наклона  $\alpha = 4^\circ$  (кривая 2) даёт некоторое снижение количества оксидных включений при низких значениях числа Рейнольдса.

При угле наклона  $\alpha = 8^\circ$  (кривая 3) можно выделить область низкой загрязненности отливки, переходную зону и область высокой загрязненности.

С увеличением скорости заполнения формы критерий  $K_{OF}$  изменяется по линейному закону, если угол наклона отливки составляет  $\sim 15^\circ$  (кривая 4). При таком положении содержание оксидных включений в литой детали находится в допустимом пределе, если значение числа  $Re$  не превышает 40500.

При  $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  характер заполнения формы и значение коэффициента  $K_{OF}$  от скоростного режима заполнения формы меняется несущественно и во всех случаях количество оксидных включений не превышает критического значения для данной отливки определенного в главе 2 ( $K_{OF} = 0,135$ ).

#### ***Выводы по разделу:***

1. Вероятность загрязненности материала отливки оксидами (значение  $K_{OF}$ ) возрастает с уменьшением угла  $\alpha$ . При этом увеличивается роль скоростного режима заполнения формы на качество отливок, уменьшается стабильность технологического процесса.

### 3.3 Дополнительные элементы литниковой системы и их влияние на содержание оксидных включений в теле отливки

Для обеспечения требуемого качества отливок из алюминиевых сплавов при литье в кокиль должны выполняться известные ограничения для скорости  $v_{\phi}$  течения расплава в рабочей полости формы  $v_{\phi min} \leq v_{\phi} \leq v_{\phi max}$ . При скорости  $v_{\phi} \leq v_{\phi min}$  возможно появление дефектов типа неслитин, а при превышении  $v_{\phi max}$  дефектов, связанных с замешиванием газов и окисных плен в расплав.

Максимально допустимые скорости потока в питателе, приведенные в работе [26] являются средними по сечению канала и определялись из условия его полного заполнения расплавом. В тоже время, на начальном этапе происходит лишь частичное заполнение литейных каналов расплавом, а максимальная скорость в потоке может существенно превышать ее среднее значение. Всё это может приводить к таким негативным, с точки зрения разрушения и замешивания оксидных плен явлениям, как вспенивание и разбрызгивание расплава, фонтанирование, волнообразование и др., что является особенно опасным в виду максимальной концентрации окислителя в полости литейной формы на начальном этапе ее заполнения.

Как уже отмечалось, при использовании нижних и боковых литниковых систем существует возможность управления скоростью подвода расплава в формообразующую полость. Для осуществления такого управления предлагается использовать дополнительный элемент литниковой системы – «промывник», конструкция которого представлена на рисунке 3.7.

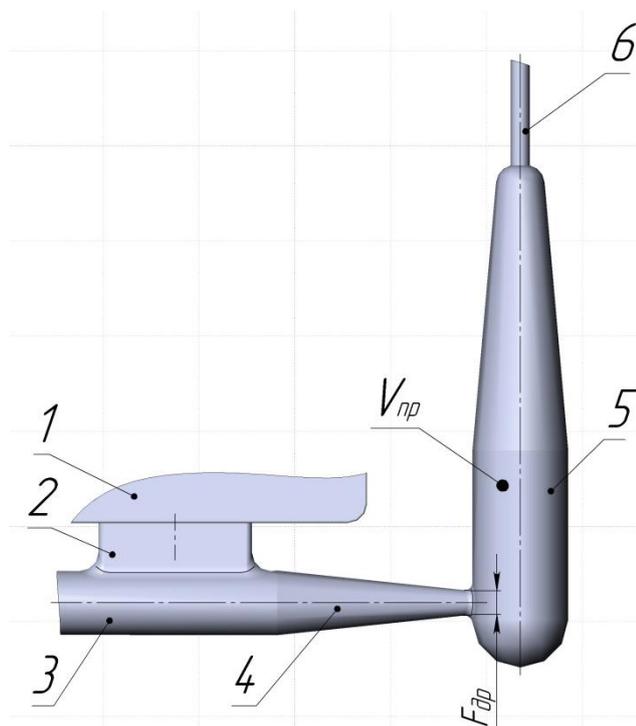


Рисунок 3.7 – Конструкция промывника: 1– отливка; 2– питатель; 3–коллектор; 4– дроссель; 5– промывник; 6–выпор, где  $F_{др}$  – площадь поперечного сечения дросселя;  $V_{пр}$  – объем промывника

Эффективность такого способа управления устанавливалась путем изучения процесса заполнения отливки «Пластина» с размерами 230x100x10мм при использовании нижней сифонной и щелевой литниковых систем, а также верхней дождевой системы. Размеры подводящих каналов принимались согласно существующим рекомендациям [26, 37, 39].

На рисунке 3.8 приведены результаты моделирования заполнения формы при использовании нижнего подвода расплава, где  $F_{ст}$  – площадь поперечного сечения стояка;  $F_{к}$  – площадь коллектора;  $F_{пит}$  – площадь питателя. При этом диаметр  $d_{ст}$  стояка назначали с учетом рекомендаций работы [26] и во всех вариантах расчета был равным 12мм. Диапазон измерительной шкалы (скорости  $v_y$ ) назначали с учетом результатов, полученных Дж. Рунёро, который показал [42], что при достижении скорости в нижнем вертикальном питателе  $\sim 0,75$  м/с возможно фонтанирование расплава.

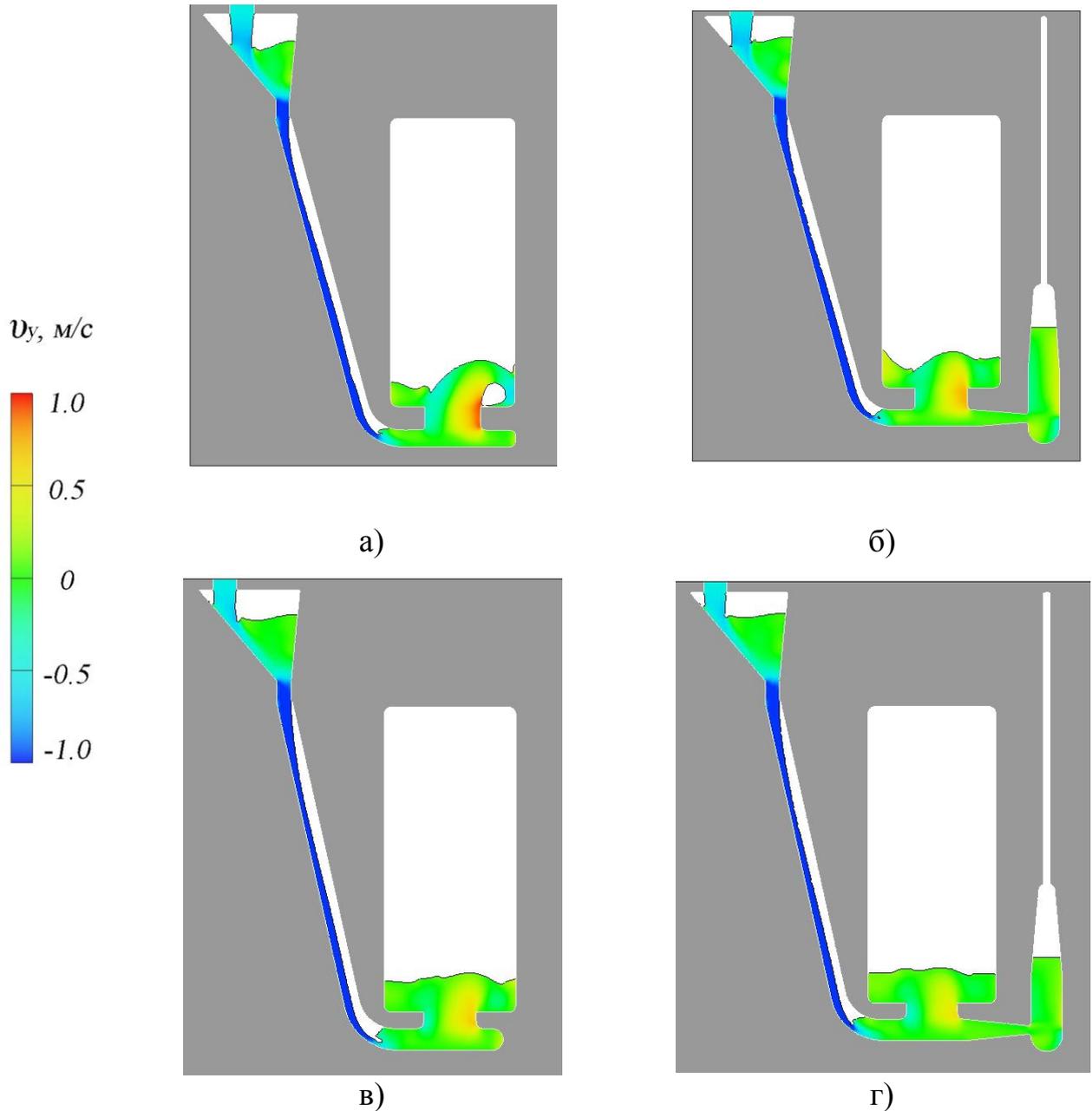


Рисунок 3.8 –Результаты моделирования начального этапа заполнения формы с нижней литниковой системой: а– традиционная литниковая система ( $F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:1.25:2.5$ ); б–система с промывником (1:1.25:2.5); в— традиционная литниковая система (1:2:3); г—система (1:2:3) с промывником (1:2:3)

Как видно (рисунок 3.8), без применения промывника и при соотношении размеров каналов литниковой системы  $F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:1.25:2.5$ , максимальное значение скорости  $v_y$  в питателе в момент начала заполнения формообразующей полости превышает 1,0 м/с. Применение дополнительного элемента литниковой си-

стемы позволяет снизить этот показатель более чем на 17% (рисунок 3.9, вариант 2) и тем самым уменьшить вероятность возникновения явления фонтанирования.

Изменение соотношения размеров каналов до рекомендуемых  $F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:2:3$  снизило значение скорости до  $v_{у\max}\approx 0,8$  м/с (рисунок 3.9, вариант 3), что сохраняет вероятность фонтанирования. Применение «промывника» уменьшило эту скорость на  $\sim 25\%$  (рисунок 3.9, вариант 4) и тем самым существенно сократило риск образования фонтанирования расплава на начальном этапе заполнения формообразующей полости.

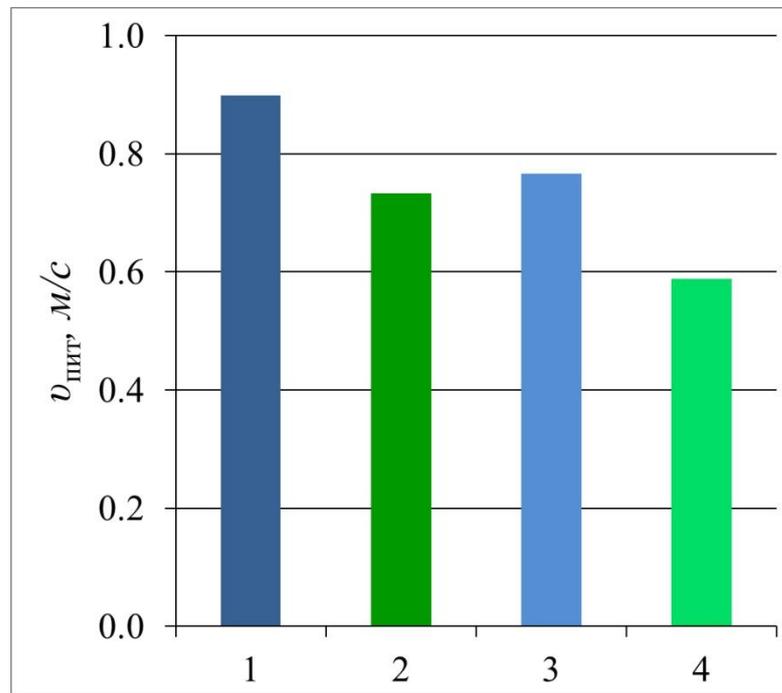


Рисунок 3.9 –Влияние конструкции литниковой системы на значение максимальной скорости  $v_{у\max}$  в питателе: 1– традиционная литниковая система ( $F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:1.25:2.5$ ); 2–система с промывником (1:1.25:2.5); 3— традиционная литниковая система (1:2:3); 4—система с промывником (1:2:3)

Для предварительной оценки значения проходного сечения дросселя  $F_{др}$  (рисунок 3.7) воспользовались соотношением, вытекающим из данных работы Рабиновича Б.В. [38]:

$$F_{др\text{ расч}} = \frac{1}{\mu} \cdot F_{ч\text{ вых}} \cdot \sqrt{\frac{H_{ч}}{H}}, \quad (3.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода литниковой системы для участка зеркало расплава в чаше – дроссель;

$F_{ч\text{ вых}}$  – площадь выпускного отверстия чаши;

$H_ч$  – уровень расплава в чаше относительно среза ее выпускного отверстия;  $H$  – перепад высот между зеркалом расплава в чаше и дросселем.

Эксперименты по определению оптимального значения площади  $F_{др}$  показали (рисунок 3.10), значение этого параметра, с точки зрения снижения скорости на выходе из питателя, может составлять  $F_{др}=(0,5\dots 1,0) F_{др\text{ расч}}$ .

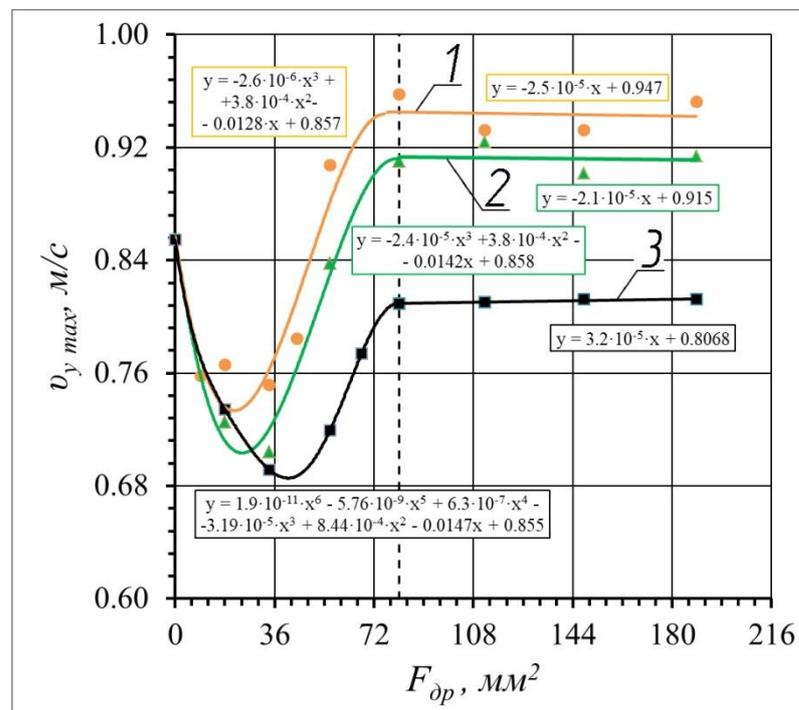


Рисунок 3.10 – Влияние площади дросселя  $F_{др}$  на значение максимальной скорости  $v_{y\text{ max}}$  в питателе: 1–  $V_{пр}=28\text{ см}^3$ ; 2–  $V_{пр}=48\text{ см}^3$ ; 3–  $V_{пр}=153\text{ см}^3$

При этом с увеличением площади  $F_{др}$  обеспечиваются условия для более полного задержания первых, наиболее загрязненных оксидами порций расплава. Вместе с тем снижаются возможности по управлению скоростью в питателе. При  $F_{др} < 0,5 F_{др\text{ расч}}$  этот дополнительный элемент литниковой системы частично или полностью утрачивает функции промывника и регулятора скоростного режима заполнения формообразующей полости кокиля.

Вместе с тем, «промывник» обеспечивает не только снижение скорости  $v_y$  в питателе, но и задерживает первые наиболее загрязненные порции расплава, по-

ступающего в формообразующую полость из чаши и подводящих каналов литниковой системы при ее традиционной схеме. При этом критерий  $K_{OF}$  снизился со значения 0,23 до 0,16 мм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

Задача обеспечения спокойного заполнения формы стоит несколько острее, если используется щелевая литниковая система, так как чаще всего её применяют для получения высоких отливок.

На рисунке 3.11 (а) дана иллюстрация работы обычной литниковой системы такого типа. Видно, что возмущение свободной поверхности расплава в начальный период заполнения формы протекает весьма интенсивно ( $K_{OF}=0,28$ ).

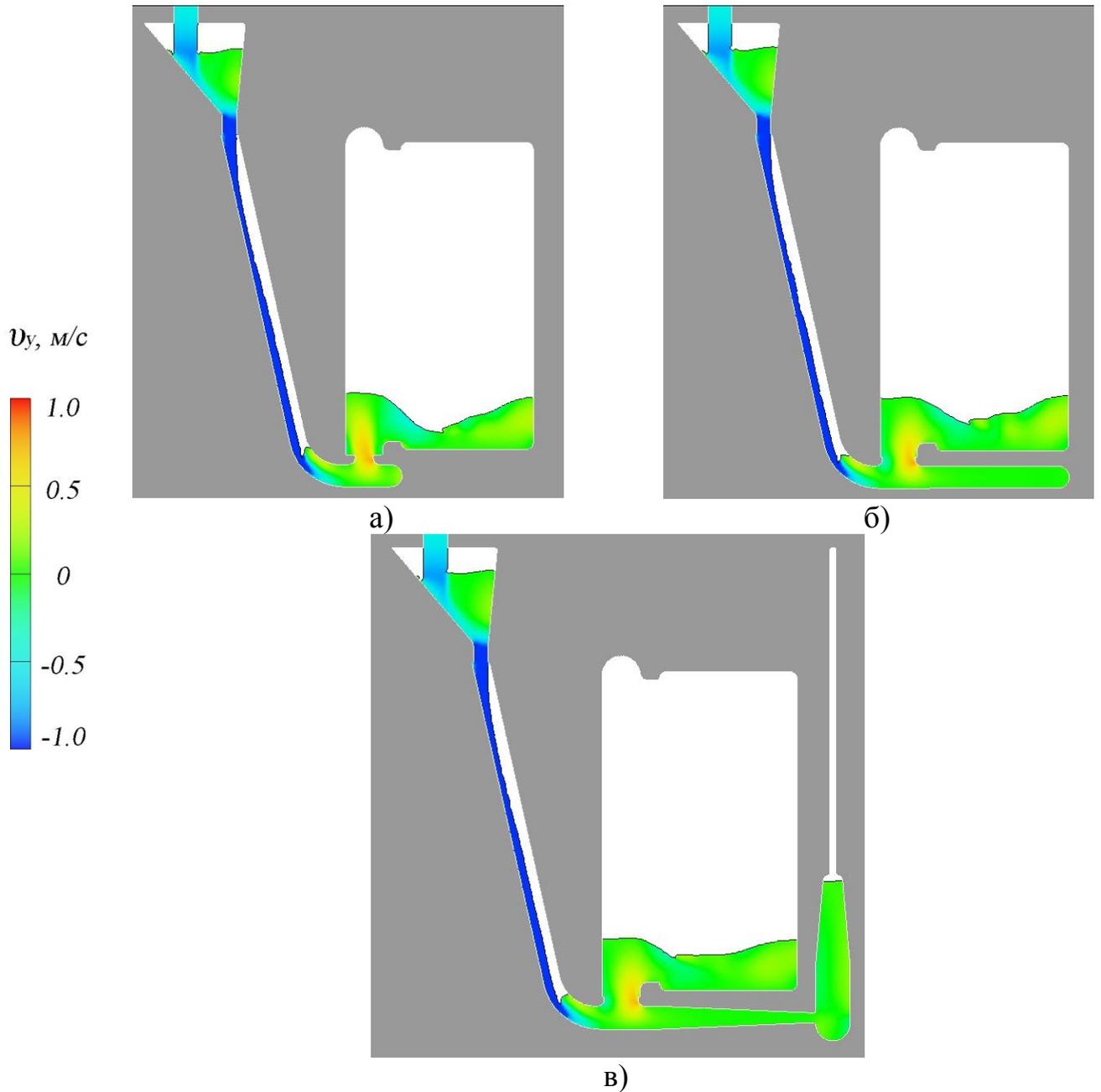


Рисунок 3.11 –Результаты моделирования начального этапа заполнения формы с щелевой литниковой системой: а)–традиционная литниковая система; б)– система с удлиненным литниковым ходом [85]; в)– система с промывником

При использовании литниковой системы такого типа с удлиненным литниковым ходом, как и в работе [85], возмущения расплава на поверхности сократились, а значение критерия  $K_{OF}$  не превысило  $0,23 \text{ мм}^3/\text{см}^3$ . Следует отметить, что использование такого коллектора позволило авторам работы [85] отказаться от фильтрующего элемента в литниковой системе.

Установка «промывника» в конце удлиненного коллектора к существенно-му изменению значения критерия  $K_{OF}$  не привела, но позволила существенно из-

менить скорость  $v_{\text{пит}}$  на выходе из питателя (рисунок 3.12, кривая 3), что особенно важно для высоких отливок. Одновременно с этим, новый элемент литниковой системы может способствовать более полному задержанию наиболее загрязненной части расплава, поступающего в формообразующую полость, по сравнению с системой с удлиненным коллектором.

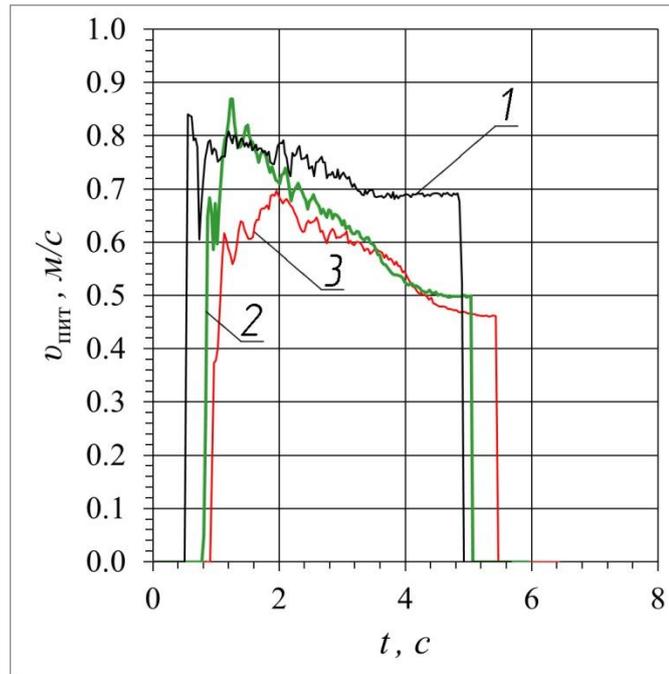


Рисунок 3.12 –Изменение максимальной скорости  $v_{\text{пит}}$  в питателе: 1– традиционная литниковая система; 2– система с удлиненным литниковым ходом [85]; 3– система с промывником

При использовании верхней литниковой системы уменьшение скорости, например, на выходе из питателя дождевой литниковой системы может быть не определяющим фактором, от которого зависит загрязненность материала отливки [90]. По этой причине при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов от таких систем, чаще всего, отказываются или используют их для невысоких отливок общего назначения. Предварительные исследования, результаты которых представлены в данном разделе, направлены на выявление возможности снижения загрязненности отливок оксидами при верхнем подводе расплава в формообразующую полость путем установки промывников. Использование таких элементов, соединенных с формообразующей полостью (рисунок 3.13) может способствовать

сосредоточению в них оксидов в виде плен и их фрагментов, интенсивно образующихся на начальном этапе заливки формы.

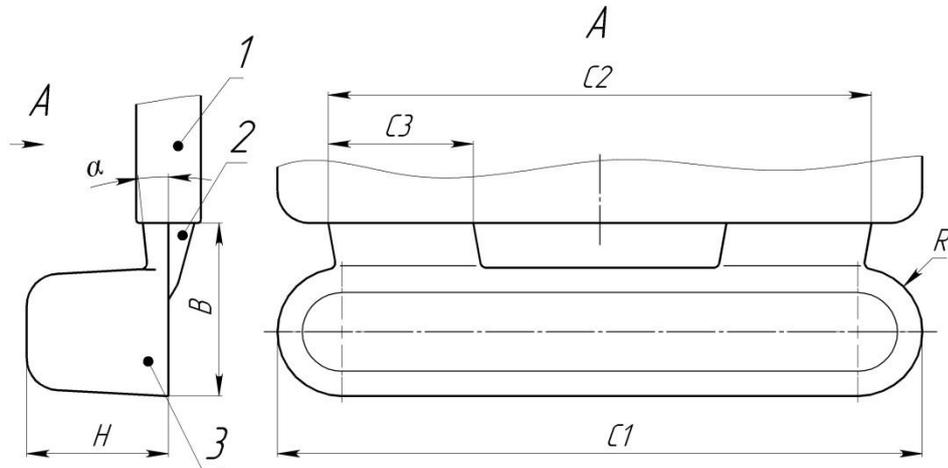


Рисунок 3.13 – Конструкция «промывника»: 1– отливка; 2– соединительный канал; 3– промывник

На первом этапе произвели оценку загрязненности отливки оксидными включениями от силы удара струи. Учитывая, что при верхнем подводе расплава длительность контакта свободной поверхности с атмосферой по сравнению с нижним и боковым подводом существенно сокращается, для использования в качестве оценочного показателя критерия  $K_{OF}$  необходимо уточнить толщину образующейся оксидной плёны. В связи с этим, в данных исследованиях производили предварительную оценку по значению средней площади  $F_{SR}$  свободной поверхности. При обработке результатов численных экспериментов силу  $N$  определяли по формуле (1.2).

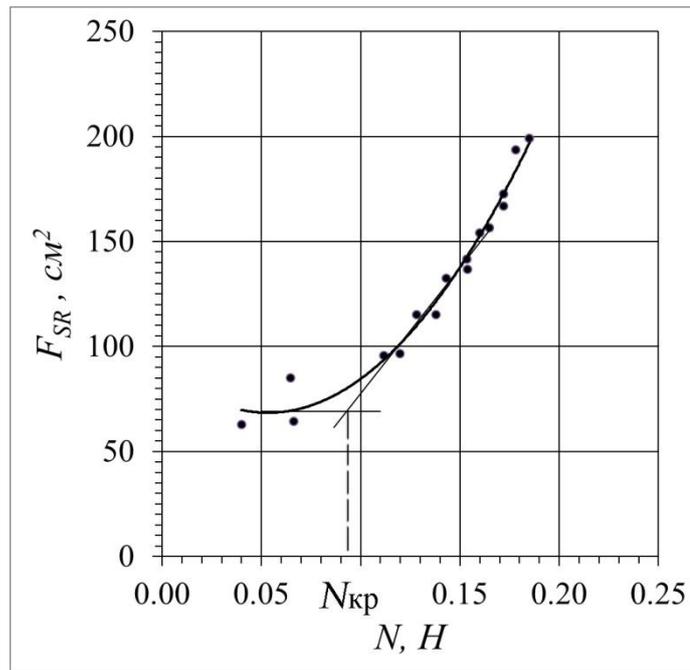


Рисунок 3.14 – Зависимость площади  $F_{SR}$  свободной поверхности расплава в форме от силы  $N$  удара струи

Зависимость площади  $F_{SR}$  свободной поверхности от силы  $N$  носит параболический характер

$$F_{SR} = 7410,59 \cdot N^2 - 790,48 \cdot N + 89,51, \quad (3.3)$$

если  $0,04 < N < 0,18 \text{H}$ . При этом значение критерия Пирсона  $R^2=0,98$ , что говорит о согласованности данных численных экспериментов и представленной зависимости.

Ее анализ показывает существование, как и в работе [90], некоторого критического значения  $N_{кр} \approx 0,09 \text{H}$  (рисунок 3.14) при превышении которого происходит существенное изменение условий протекания окислительных процессов, вызывающих более интенсивное загрязнение материала отливки. Отличие значений  $N_{кр}$ , полученных посредством численных экспериментов и натуральных, описанных в работе [90], можно объяснить, например, разными условиями заливки литейной формы и другими факторами.

Видно (рисунок 3.15, б), что при использовании промывника возмущение зеркала расплава в формообразующей полости на начальном этапе заметно уменьшается по сравнению с заливкой обычной формы (рисунок 3.15, а). Одно-

временно с этим основная часть наиболее загрязненного расплава, поступившая в полость сосредоточена в промывнике.

При увеличении массовой скорости заливки и, следовательно, силы  $N$  ударной струи возмущения свободной поверхности возрастают (рисунок 3.15, в), что увеличивает и вероятность более существенного поражения отливки оксидами даже при использовании промывников.

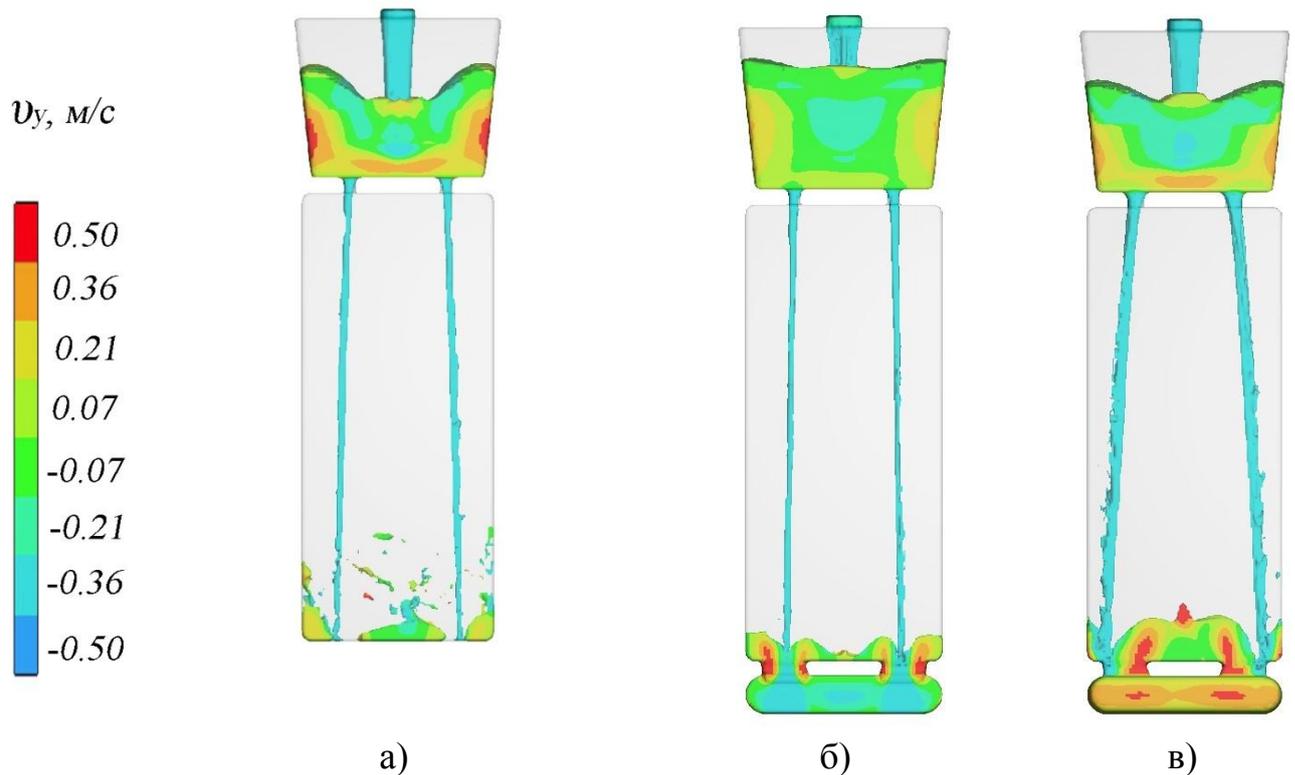


Рисунок 3.15 – Результаты моделирования начального этапа заполнения формы с верхней литниковой системой при использовании: а– обычной формы,  $N=0, I \approx N_{\text{кр}}$ ; б– формы с промывником,  $N=0, I \approx N_{\text{кр}}$ ; в– формы с промывником,  $N=0, I > N_{\text{кр}}$

Все это послужило причиной отдельного рассмотрения особенностей заполнения литейных форм с использованием верхних литниковых систем.

### **Выводы по разделу:**

1. При использовании нижних и боковых литниковых систем уменьшение скорости расплава в питателе на начальном этапе заполнения формы и содержания неметаллических включений в отливках возможно путем использования дополнительного элемента литниковой системы (промывника), соединенного с коллектором через дроссель;

2. Геометрические размеры дросселя и промывника определяются конфигурацией отливки, местом подвода расплава и необходимым законом изменения скорости в питателе;

3. Использование промывника может приводить к некоторому снижению коэффициента использования металла, и оправдано лишь в тех случаях, когда традиционные менее материалоемкие способы не обеспечивают требуемого конечного результата;

4. При использовании верхних литниковых систем уменьшение загрязненности отливок из алюминиевых сплавов оксидами возможно путем их сосредоточения в «промывниках», соединенных с формообразующей полостью;

5. Учитывая, что толщина оксидной пленки может меняться в достаточно широких пределах (таблица 1.1), а данные о её значениях при использовании верхней литниковой системы отсутствуют, для уточнения наиболее вероятной средней толщины оксидных плен, которые образуются при использовании такого способа подвода расплава, требуют уточнения и дополнительных исследований.

### **3.4 Особенности протекания окислительных процессов расплава при верхней заливке формы**

В разработанном во второй главе критерии  $K_{OF}$  (2.1) оценки загрязненности металла оксидными включениями учитывается средняя толщина  $h_P$  образующихся оксидов. Очевидно, что эта толщина существенно зависит от длительности контакта свободной поверхности расплава с атмосферой формы. При нижнем подводе расплава чаще всего реализуются условия для плавного подъема его уровня в форме без существенного возмущения свободной поверхности и, следовательно, ее обновления. В.В. Чистяков показал [52], что при таком заполнении формы средняя толщина образующейся оксидной пленки может достигать 5 мкм. Это значение было использовано нами в предыдущих исследованиях, выполненных с применением нижнего подвода расплава к формообразующей полости.

При использовании верхнего подвода расплава, его свободная поверхность постоянно обновляется, образующиеся оксидные пленки разрушаются и замешиваются в поток, в связи с чем, их толщина может существенно отличаться от толщин при более спокойном заполнении формы.

Для уточнения наиболее вероятной средней толщины оксидных плен, которые образуются при применении верхних литниковых систем, воспользовались результатами исследований о влиянии силы  $N$  удара струи расплава на загрязненность отливки [90].

На первом этапе, посредством численного моделирования, повторили натурные эксперименты, выполненные Ю.С. Федуловой [90]. Эскиз заливаемой формы представлен на рисунке 3.16.

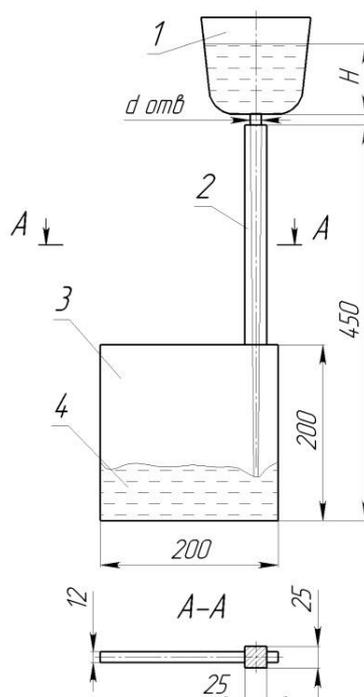


Рисунок 3.16 – Эскиз формы для определения критической силы удара струи [90]:  
1-чаша; 2-колодец; 3-формообразующая полость; 4-расплав

Учитывая то, что заливка формы в натурных экспериментах происходила при постоянном напоре  $H$  в чаше, а также для сокращения длительности вычислительных экспериментов при моделировании использовалась 3D модель формы без литниковой чаши. При этом диаметр струи и начальная скорость поступающего в колодец 2 расплава в каждом эксперименте соответствовали диаметру выпускно-

го отверстия чаши  $d_{ome}$  и уровню  $H$  расплава в ней, которые изменялись в соответствии с таблицей 3.1 [90].

Таблица 3.1 – Исходные данные для моделирования процесса заливки

№ численного эксперимента	Диаметр отверстия $d_{отв}$ , мм	Напор $H$ , м	Расчетная сила $N$ удара струи, Н
1	0,012	0,1	0,498
2	0,010		0,345
3	0,008		0,221
4	0,010	0,05	0,236
5	0,008		0,118
6	0,004		0,038

В качестве примера на рисунке 3.17 показано изменение площади  $F_{SR}$  свободной поверхности расплава в форме при проведении численных экспериментов 2 и 5 (таблица 3.1).

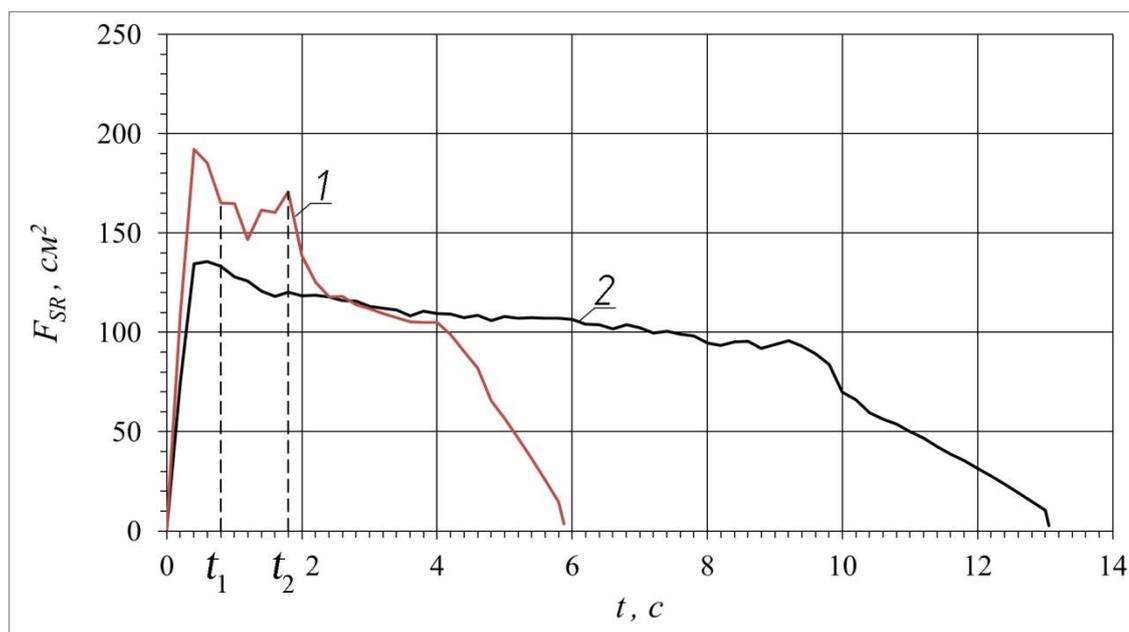


Рисунок 3.17 – Кинетика изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности:  
1–эксперимент 2; 2– эксперимент 5

Видно, что заполнение формы при силе  $N=0,345 > N_{кр}$  удара струи (рисунок 1.16, кривая 1) максимальная площадь  $F_{SR}$  возмущенной свободной поверхности более чем на 30% отличается от площади при заполнении со значением силы удара  $N=0,118$ Н (кривая 2).

Рисунок 3.18 иллюстрирует поведение расплава в форме при рассматриваемых вариантах заливки на моменты времени  $t_1=0,8\text{с}$  (рисунок 3.18 а, в) и  $t_2=1,8\text{с}$  (рисунок 3.18 б, г).

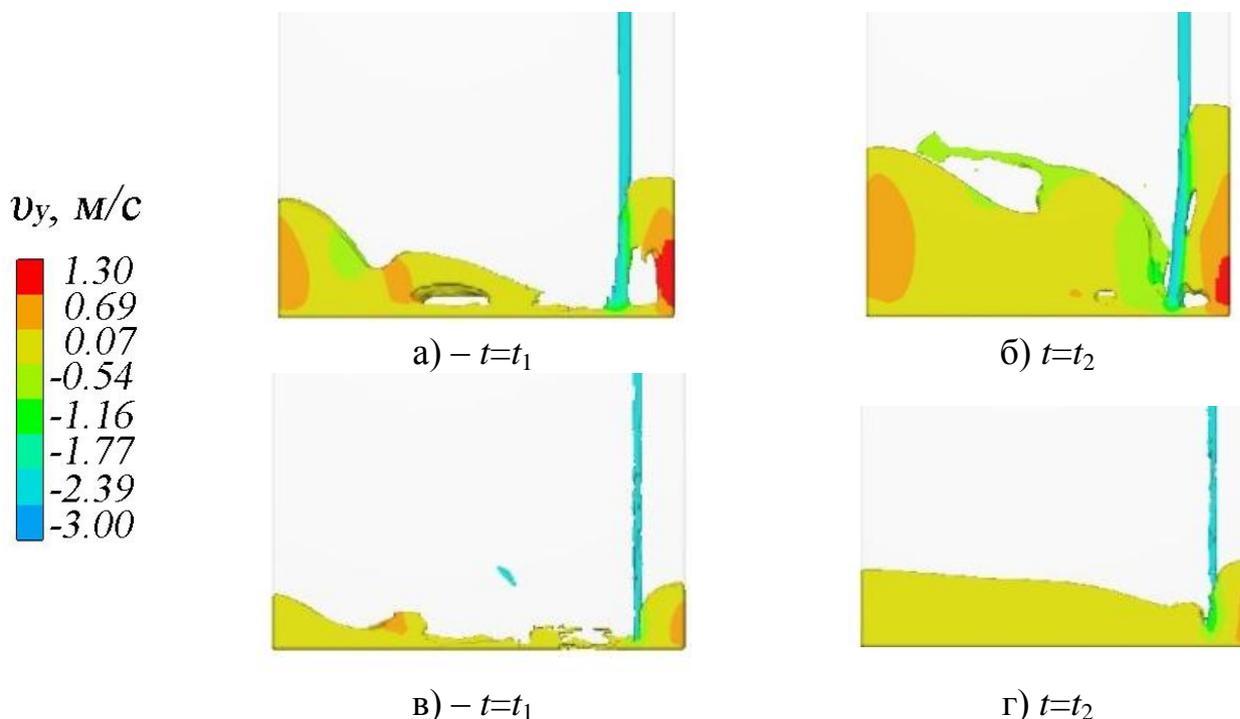


Рисунок 3.18 – Особенности заполнения формообразующей полости в экспериментах: а, б– №2; в, г – №5

Таким образом, проведенные численные эксперименты показали (рисунок 3.18), что заполнение формы при  $N > N_{кр} = 0,2\text{Н}$  сопровождается сильным возмущением свободной поверхности и замешиванием газов в материал отливки (рисунок 3.18 а, б). В экспериментах при  $N < 0,2\text{Н}$  это замешивание практически отсутствовало и проявлялось в значительно меньшей степени лишь при значениях силы  $N$  удара близких к критическим (рисунок 3.18 в, г).

Из этого следует, что загрязненность отливки до значения силы удара  $N = 0,2\text{Н}$  в основном определяется образованием оксидных включений (рисунок 3.19 область I), а при больших ее значениях преобладающими становятся газовые раковины (область II).

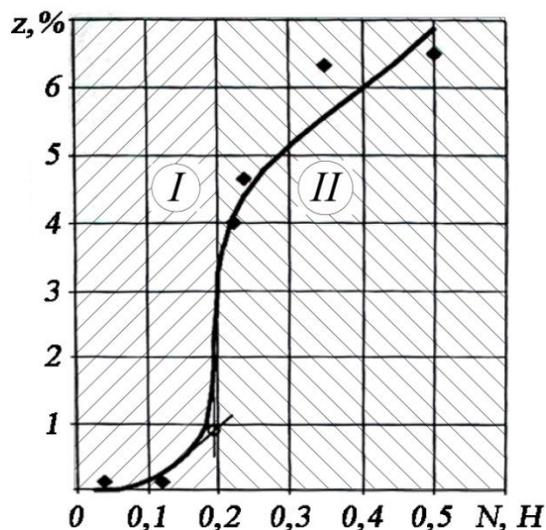


Рисунок 3.19 – Зависимость загрязненности материала отливки от силы  $N$  удара струи расплава:  $I$  – область с преобладающим загрязнением материала отливки оксидами;  $II$  – область с преобладающим поражением отливки газowymi раковинами

Следует так же обратить внимание на то, что максимальная загрязненность отливки в работе [90] составляет 6,5%, а на пробе М.В. Шарова и Н.М. Галдина в самых неблагоприятных условиях это значение не превышает 0,3% [41]. Вместе с тем, результаты (загрязненность 0,25%), полученные при малых значениях силы  $N$  согласуются с результатами работы [41], что подтверждает сделанные выводы по анализу зависимости, представленной на рисунке 3.19.

На втором этапе было выполнено более детальное исследование влияния на загрязненность отливки низких значений силы  $N$  удара струи ( $0,025 < N < 0,25 Н$ ). При этом потребовалось использовать модель, изображенную на рисунке 3.20. Она отличается от предыдущей отсутствием колодца и меньшими размерами формообразующей полости.

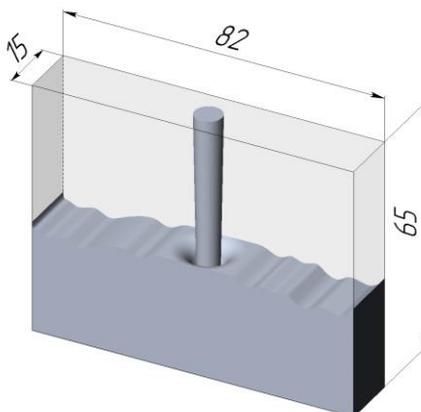


Рисунок 3.20 – Модель экспериментальной формы для определения толщины оксидной пленки при верхнем подводе расплава

В результате численных экспериментов было уточнено критическое значение силы удара струи  $N_{кр}=0,142H$ , а также установлена соответствующая этой силе среднеинтегральная площадь свободной поверхности  $F_{SRi}=29,71 \text{ см}^2$ .

Учитывая допущения, принятые в разделе 2.2, толщину оксидной пленки определили из выражения:

$$h_p = \frac{V_{SRmax}}{F_{SRi}}, \quad (3.4)$$

где  $V_{SRmax}$  – максимальный объем оксидов, образующихся в форме.

Для рассмотренных условий заливки формы (объемом  $79,95 \text{ см}^3$ ) этот объем оксидов равен

$V_{SRmax}=8,3 \cdot 10^{-5} \cdot 79,95 = 6,636 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$ , а средняя толщина оксидных плен

$$h_p = \frac{6,636 \cdot 10^{-3}}{29,71} = 0,000223 \text{ см} \quad (3.5)$$

Округляя полученное значение, для последующих расчетов приняли  $h_p=0,002 \text{ мм}$ , что согласуется с приведенными выше данными по толщинам оксидных плен, образующихся в отливках (таблица 1.1).

После обработки результатов всех экспериментов по заливке формы (рисунок 3.20) в программе Excel, была получена зависимость  $K_{OF}$  от силы удара струи при  $h_p=0,002 \text{ мм}$  (рисунок 3.21, кривая 1):

$$K_{OF} = 0,3766N + 0,0295 \quad (3.6)$$

Данное выражение имеет степень достоверности  $R^2=0,9583$ .

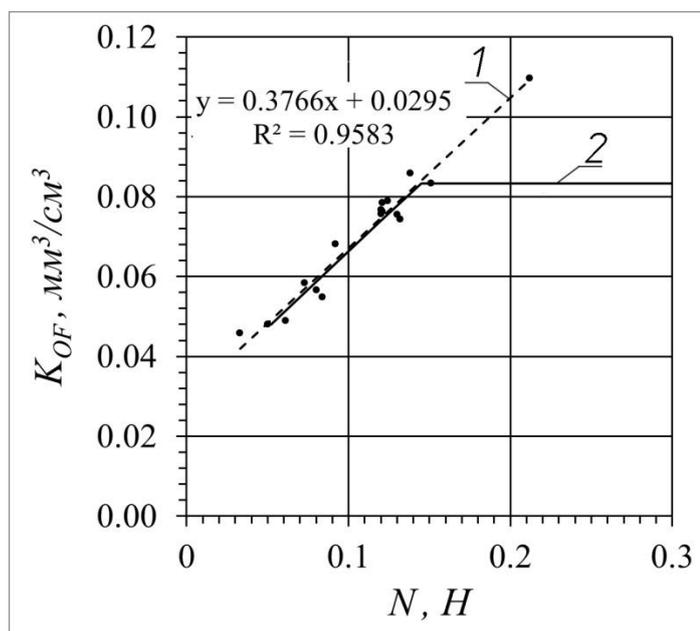


Рисунок 3.21 – Зависимость критерия  $K_{OF}$  загрязненности металла от силы удара струи: 1-результат обработки данных в программе Excel; 2-  $K_{OF} = f(N)$  с учетом  $(K_{OF})_{max}=0,083 \text{ мм}^3/\text{см}^3$

Принимая во внимание, что  $K_{OF} \leq K_{OFmax}$  получаем уточненную зависимость  $K_{OF} = f(N)$  (рисунок 3.21, кривая 2):

$$\begin{cases} K_{OF} = 0,3766N + 0,0295, \text{ при } 0 \leq N \leq 0,142 \text{ Н,} \\ K_{OF} = 0,083, \text{ при } N > 0,142 \text{ Н} \end{cases} \quad (3.7)$$

#### **Выводы по разделу:**

1. Сопоставление результатов численных и натуральных экспериментов по определению зависимости загрязненности материала отливки от силы  $N$  удара струи расплава показало, что при низких значениях этого параметра ( $0,025 < N < 0,25$  Н) загрязненность отливки в основном определяется образованием оксидных включений, а при  $N > 0,25$  Н преобладающими становятся газовые раковины;

2. Значение толщины оксидных плен и их фрагментов существенно зависит от длительности контакта свободной поверхности с атмосферой формы. Установлено, что в случае верхнего подвода расплава средняя толщина  $h_p$  плен может составлять  $\sim 0,002$  мм.

### Выводы по главе 3

1. Снижение вероятности загрязнения отливки оксидными включениями возможно путем уменьшения температуры расплава перед его заливкой в форму.
2. Вероятность загрязненности материала отливки оксидами (значение  $K_{OF}$ ) возрастает с уменьшением угла  $\alpha$ . Это обусловлено, например, повышением склонности потока расплава, поступающего в формообразующую полость, к струйному хаотичному течению. При этом увеличивается роль скоростного режима заполнения формы на качество отливок и уменьшается стабильность технологического процесса.
3. При использовании нижних и боковых литниковых систем уменьшение скорости расплава в питателе на начальном этапе заполнения формы и содержания неметаллических включений в отливках возможно путем использования дополнительного элемента литниковой системы (промывника), соединенного с коллектором через дроссель. Геометрические размеры дросселя и промывника определяются конфигурацией отливки, местом подвода расплава и необходимым законом изменения скорости в питателе.
4. При использовании верхних литниковых систем уменьшение загрязненности отливок из алюминиевых сплавов оксидами возможно путем их сосредоточения в «промывниках» соединенных с формообразующей полостью.
5. Значение толщины оксидных плен и их фрагментов существенно зависит от длительности контакта свободной поверхности с атмосферой формы. Установлено, что в случае верхнего подвода расплава средняя толщина  $h_p$  плен может составлять  $\sim 0,002$  мм.

## 4. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВО

### 4.1 Анализ заводской технологии изготовления отливки «Поршень»

Литературный обзор показал [26, 36, 116, 39, 77, 42 и др.], что ведущими специалистами, как у нас в стране, так и за рубежом, использование верхних литниковых систем при литье в кокиль отливок из алюминиевых сплавов не рекомендуется (особенно для крупногабаритных изделий). Вместе с тем, успешное применение систем такой конструкции при изготовлении и отливок ответственного назначения встречается на практике нередко. Например, литая заготовка поршня двигателя легкового автомобиля, работающего в тяжелых термических условиях и при высоких циклических нагрузках (рисунок 4.1).

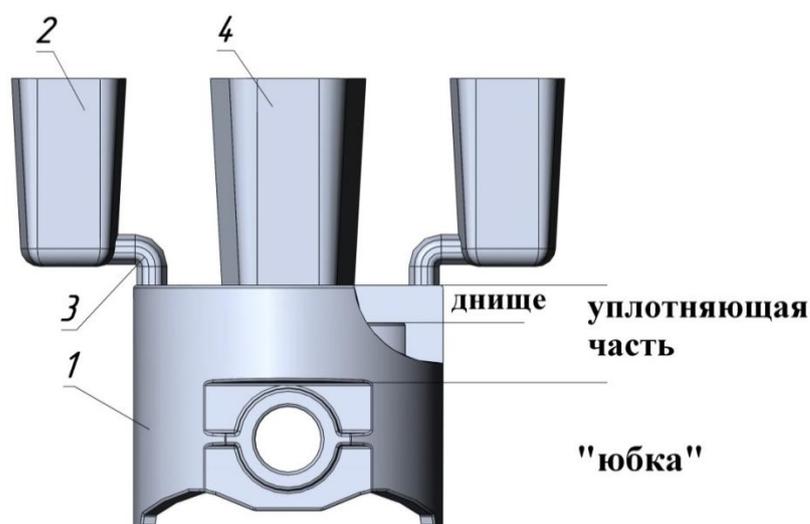


Рисунок 4.1 – Поршень двигателя легкового автомобиля с элементами литейной формы: 1 – отливка «Поршень»; 2 – литниковая чаша; 3 – стояк; 4 – прибыль

Заполнение формы происходит сверху посредством чаш 2 через два небольших стояка 3 изогнутой конструкции, а питание затвердевающей отливки 1 открытой прибылью 4, расположенной в непосредственной близости от подводящих элементов литниковой системы.

Учитывая, что в условиях эксплуатации наиболее нагруженной является уплотняющая часть отливки, необходимо стремиться к минимальному содержанию в ней оксидных плен и их фрагментов, что также будет способствовать более эффективной работе прибыли.

Решение вопроса о том, в какой степени указанные требования выполняются при использовании литниковой системы, приведенной на рисунке 4.1 конструкции, с использованием критерия  $K_{OF}$ , а также оценка возможности повышения качества этих изделий путем применения предложенных в работе технических решений, является целью дальнейшего исследования. Очевидно, что их результаты, можно рассматривать и в качестве дополнительного оценочного средства для проверки возможности использования, предлагаемой методики прогнозирования загрязненности алюминиевых сплавов оксидами при литье в кокиль фасонных отливок.

#### **4.1.1 Влияние параметров заливки кокиля на загрязненность отливки оксидными включениями**

Количество образующихся оксидов в рабочей полости формы во многом определяется степенью и продолжительностью возмущения свободной поверхности расплава при заполнении формы. Такое поведение свободной поверхности напрямую связано со скоростным режимом заполнения, который может определяться, например, площадью поперечных сечений подводящих элементов литниковой системы (в данном случае суммарной площадью  $\Sigma F_{cm}$  поперечного сечения стояков).

Для выявления предельного допустимого значения площади поперечного сечения стояка при получении отливки «Поршень» численные эксперименты проводили изменяя диаметр стояка от 6 мм до 9,0 мм, что соответствует  $F_{ct} = 28,27 \text{ мм}^2$  ( $d_{ct} = 6 \text{ мм}$ ),  $33,17 \text{ мм}^2$  (6,5 мм),  $38,47 \text{ мм}^2$  (7,0 мм),  $44,16 \text{ мм}^2$  (7,5 мм),  $50,26 \text{ мм}^2$  (8,0 мм),  $56,72 \text{ мм}^2$  (8,5 мм),  $63,59 \text{ мм}^2$  – (9,0 мм), при этом уровень расплава в чаше (от ее дна) в установившемся режиме имел значение 45 мм.

Обработка результатов моделирования проводилась следующим образом: вначале изучали кинетику изменения площади свободной поверхности расплава при заливке формы; затем устанавливали этапы возмущенного и спокойного заполнения, после чего производили оценку степени возможной загрязненности отливки оксидными включениями с помощью критерия  $K_{OF}$ .

#### 4.1.1.1 Этапы заполнения формы

Численное моделирование (в программе Flow 3D) процесса заливки кокиля для рассматриваемой отливки «Поршень», показало (рисунок 4.2), что для нее можно выделить следующие основные этапы заполнения формы: *I* – заполнение чаш до установившегося значения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности расплава в них; *II* – заполнение формообразующей полости (*IIa*– начальный этап заполнения юбочной части поршня; *IIб*– установившееся заполнение юбочной и уплотняющей частей; *IIв* – формирование днища поршня); *III* – завершающий этап (заполнение прибыльной полости).

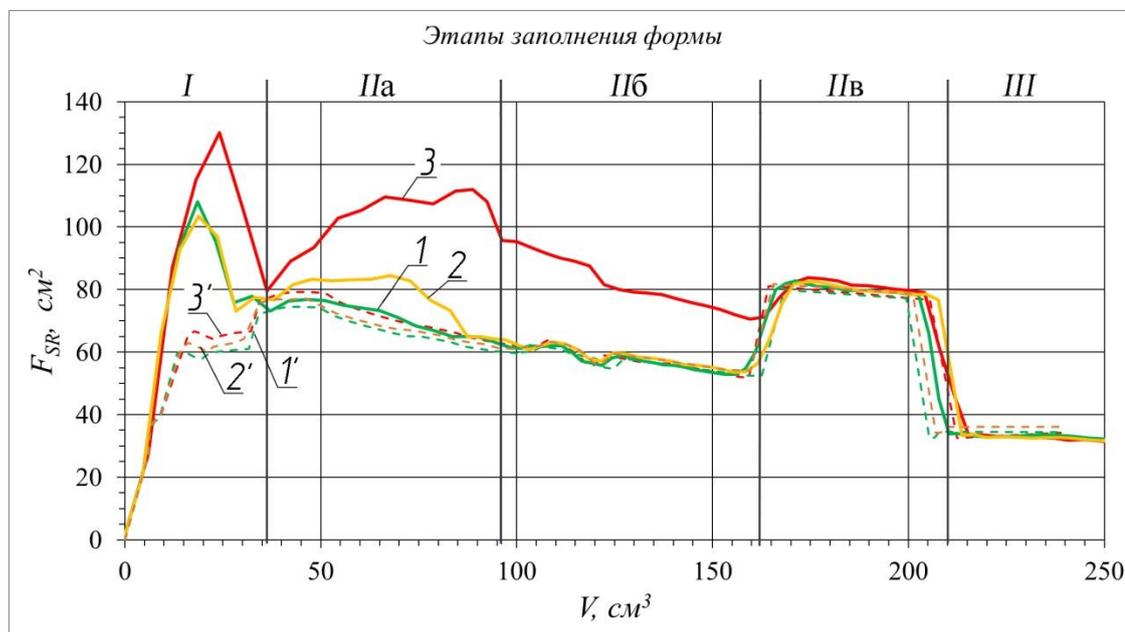


Рисунок 4.2 – Графики изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности расплава в зависимости от его объема, поступившего в форму: 1 –  $d_{ст} = 6,5$  мм (FLOW 3D); 1' –  $d_{ст} = 6,5$  мм (SOLIDWORKS); 2, 2' –  $d_{ст} = 8,0$  мм; 3, 3' –  $d_{ст} = 9,0$  мм, соответственно; *I* – этап заполнения чаш до установившегося значения; *IIa* – начальный этап заполнения юбочной части поршня; *IIб* – установившееся заполнение юбочной и уплотняющей частей; *IIв* – формирование днища поршня; *III* – завершающий этап (заполнение прибыльной полости)

Этапы возмущенного заполнения формы были установлены путем сравнения кривых изменения площадей свободной поверхности, полученных при численном моделировании процесса (кривые 1, 2, 3 рисунок 4.2) с соответствующими им значениями площадей невозмущенных поверхностей расплава (кривые 1', 2', 3'). Определение последних зависимостей осуществлялось в программе SOLIDWORKS путем разбиения модели плоскостями с шагом соответствующим размеру расчетной сетки (рисунок 4.3). При этом площадь зеркала расплава в полостях разбиения и свободной поверхности струй на каждом шаге соответствовала их геометрическим значениям, т. е. невозмущенным.

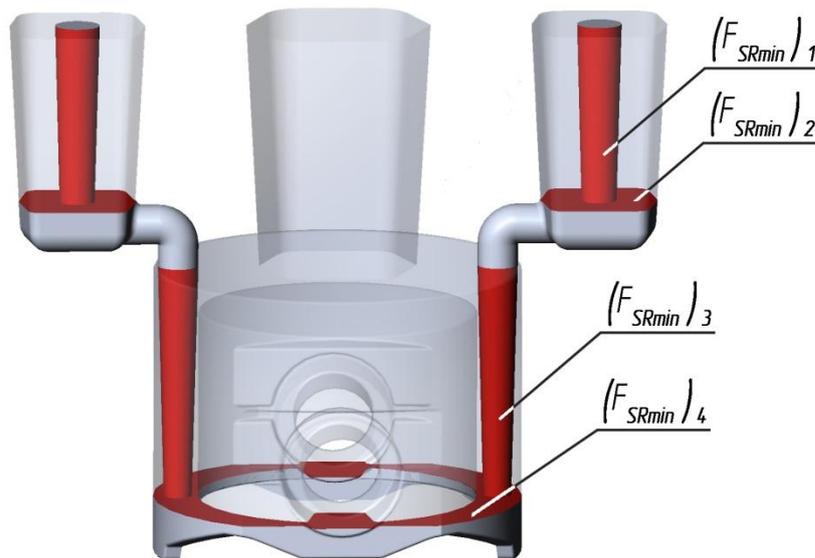


Рисунок 4.3 – Расчетная схема для определения в программе SOLIDWORKS минимальной площади  $(F_{SRmin}) = 2(F_{SRmin})_1 + 2(F_{SRmin})_2 + 2(F_{SRmin})_3 + (F_{SRmin})_4$  свободной поверхности, выделенной красным цветом

Из рисунка 4.2 видно, что этап *I* заполнения чаш характеризуется сильным возмущением свободной поверхности расплава для всех исследуемых вариантов литниковой системы. В тоже время второй этап в зависимости от размера стояков может протекать без существенных отклонений площади  $F_{SR}$  свободной поверхности от значения  $F_{SRmin}$  при невозмущенном ее состоянии на всем протяжении заполнения ( $d_{ст} = 6,5$  мм кривые 1, 1'); с возмущением свободной поверхности только на начальном (*IIa*) этапе ( $d_{ст} = 8$  мм кривые 2, 2'); либо с возмущением

вплоть до начала формирования днища «Поршня» ( $d_{ст} = 9$  мм кривые 3, 3'). Во всех вариантах этапы *IIв* и *III* протекают при минимальном значении площади свободной поверхности расплава. Кроме того, количество окислителя в форме на этих этапах будет также минимальным либо будет полное его отсутствие в виду ограниченности объема кислорода в форме, его вытеснения расплавом, а также интенсивности протекания окислительных процессов на начальных этапах заполнения. В связи с этим, для более точной сравнительной оценки степени влияния на загрязненность отливки оксидными включениями процессов, происходящих в формообразующей полости, этапы *I*, *IIв* и *III* исключены из дальнейшего рассмотрения.

#### **4.1.1.2 Оценка степени загрязненности отливки оксидными включениями**

Для оценки степени загрязненности отливки оксидными включениями, по методике, изложенной во второй главе работы, определялся критерий  $K_{OF}$  на момент времени соответствующий окончанию этапа *IIб* заполнения кокиля. При этом учитывались зависимости для  $F_{SR}$  (рисунок 4.2) и определенная в третьей главе средняя толщина пленки  $h_p = 0,002$  мм.

Как видно из рисунка 4.4 значения критерия  $K_{OF}$  резко увеличиваются при превышении площади поперечного сечения  $F_{ст} = 44,16$  мм<sup>2</sup> ( $d_{ст} = 7,5$  мм). Из этого следует, что использование стояков рассматриваемой конструкции при получении отливок подобных исследуемой, диаметром более 7,5 мм не рекомендуется.

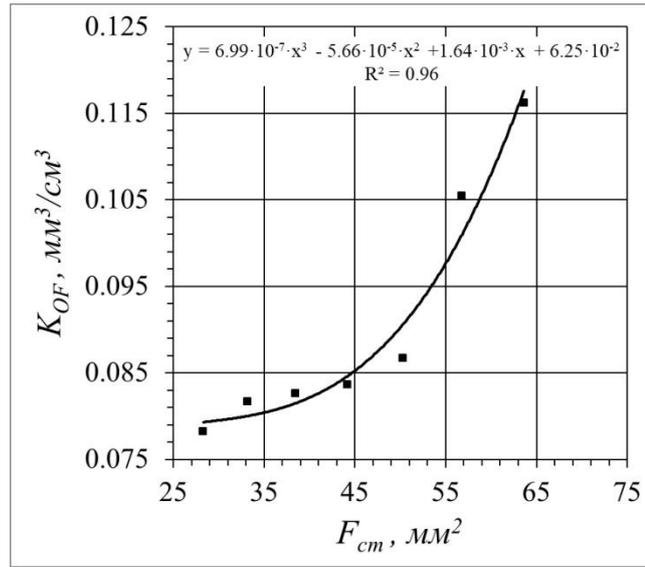


Рисунок 4.4 – Зависимость загрязненности металла оксидными включениями ( $K_{OF}$ ) от площади поперечного сечения стояка  $F_{cm}$

С целью некоторого обобщения полученной зависимости, установили влияние силы  $N$  удара струи расплава по его зеркалу в форме на вероятную загрязненность материала отливки. С этой целью были использованы данные работы [90]. Принимая в выражении (1.2):  $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu=0,53$  [117];  $H = 0,045 \text{ м}$ ;  $h = 0,065 \text{ м}$ , получили зависимость силы  $N$  от радиуса  $r$  нижнего сечения стояка:

$$N = 2\rho\pi r^2 g \mu \sqrt{H(\mu^2 H + h)} = 2 \cdot 2600 \cdot r^2 \cdot 9,8 \cdot 0,53 \cdot \sqrt{0,045(0,53^2 \cdot 0,045 + 0,065)} = 5021 \cdot r^2 \quad (4.1)$$

Определив по формуле (4.1) значения сил  $N$  для каждого из рассматриваемых стояков и учитывая данные, представленные на рисунке 4.4, после обработки результатов в программе Excel, получили зависимость  $K_{OF}$  от силы удара струи (рисунок 4.5):

$$\begin{cases} K_{OF} = 209,29N^3 - 31,18N^2 + 1,6647N + 0,0482, \text{ при } 0,045 \leq N \leq 0,1041H, \\ K_{OF} = 0,121, \text{ при } N > 0,1041H \end{cases} \quad (4.2)$$

Установленная корреляционная связь является статистически значимой, так как значение коэффициента корреляции Пирсона  $R^2=0,9759$ .

Полученная зависимость учитывает максимально возможное значение критерия  $K_{OFmax}=0,121 \text{ мм}^3/\text{см}^3$ , которое определено следующим образом:

$$K_{OFmax} = \frac{V_{SRmax}}{V_o}, \quad (4.3)$$

где

$$V_{SRmax} = V_{AL_2O_3} \cdot V_{\phi}, \text{ мм}^3;$$

$V_{AL_2O_3}$ — объем оксидов, образующихся из 1 см<sup>3</sup> воздуха содержащегося в форме ( $V_{AL_2O_3} = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$  (см. раздел 2.2));

$V_{\phi}$ — объем рабочей полости формы ( $V_{\phi} = 224 \text{ см}^3$  при условии, что кислород, находящийся в прибыльной части формы, в окислении расплава на первых двух этапах заполнения ее формообразующей полости участия не принимает);

$$V_o \text{— объем отливки } (V_o = 154 \text{ см}^3).$$

Тогда:

$$K_{OFmax} = \frac{8,3 \cdot 10^{-5} \cdot 224 \cdot 1000}{154} = 0,121 \quad (4.4)$$

Графическое отображение зависимости степени загрязненности материала отливки ( $K_{OF}$ ) «Поршень» от силы удара струи представлено на рисунке 4.5.

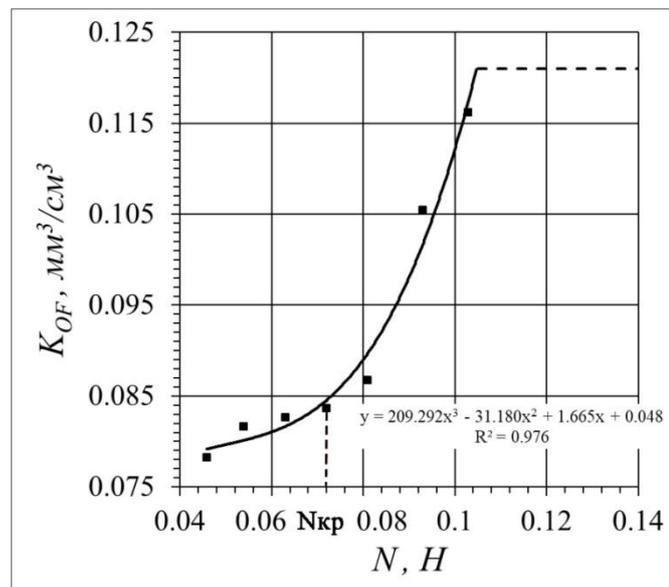


Рисунок 4.5 – Зависимость степени загрязненности материала отливки ( $K_{OF}$ ) «Поршень» от силы  $N$  удара струи

Из рисунка 4.5 видно, что для данного кокиля существует критическое значение силы  $N_{кр} = 0,072$  Н, которое достигается при диаметре стояка 7,5 мм (для формы, используемой в работе [90]  $N_{кр} = 0,2$  Н). Более жесткое пороговое значение можно объяснить более сложной геометрией формы и встречным течением расплава, поступающего через два стояка.

### 4.1.1.3 Оценка вероятности перераспределения оксидов

Как уже отмечалось, фрагменты оксидных плен, присутствующие в расплаве, во время заполнения формы могут перераспределяться в объеме отливки движущимся потоком, что, в свою очередь, может приводить к повышению пористости и снижению, например, механических свойств отдельных частей отливки.

К существенным факторам, которые могут оказывать влияние на перераспределение оксидов при верхней заливке формы, можно отнести скорость  $v_y$  в восходящих потоках. Очевидно, что данный параметр в основном определяется силой  $N$  удара подающей струи, а также вязкостью  $\eta$  самого расплава.

Влияние силы  $N$  удара струи поступающего в форму расплава на скорость  $v_y$  показано на рисунке 4.6. Заметим, что представленные на рисунке зависимости построены по значениям скоростей  $v_y$  в зонах падения струй расплава поступающего из стояков. В остальных частях формообразующей полости эта скорость значительно ниже при всех вариантах выполненных расчетов. При этом значение скорости определялось как на начальном этапе заполнения рабочей полости (25% заполнения - кривая 1, рисунок 4.6), так и на завершающем, перед заполнением дна поршня (65% заполнения - кривая 2).

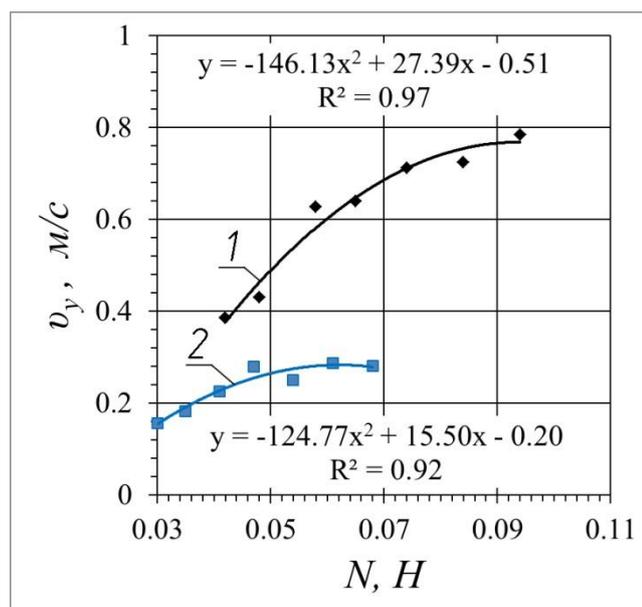


Рисунок 4.6 – Зависимость максимальной скорости  $v_y$  в восходящих потоках от силы  $N$  удара струи: 1 – при 25% заполнении отливки; 2 – 65% заполнении отливки

При заполнении формообразующей полости на 25% влияние силы  $N$  падающей струи на скорость  $v_y$  в восходящих потоках достаточно велико (рисунок 4.6, кривая 1). По мере подъема уровня расплава влияние  $N$  уменьшается и на момент начала заполнения днища «Поршня» (рисунок 4.6, кривая 2) не будет приводить к существенному выносу оксидов в эту часть отливки.

Очевидно, что влияние вязкости  $\eta$  расплава на скорость  $v_y$  в восходящих потоках будет проявляться при более низких значениях температуры заливки. Исследование проводили при критическом значении силы удара струи  $N_{кр}$ , определенном в пункте 4.1.1.2 (т.е. при диаметре стояка равном 7,5 мм).

Согласно полученным результатам представленным на рисунке 4.7 разница в скоростях восходящих потоков в диапазоне температур от 873К до 973 К при заполнении формообразующей полости на 25% не превышает 10%, а при заполнении на 65% эта разница не более 25%. Это объясняется тем, что при меньшем количестве расплава в форме его температура значительно выше температуры ликвидуса  $T_L$  и вязкие свойства оказывают меньшее влияние на исследуемый параметр.

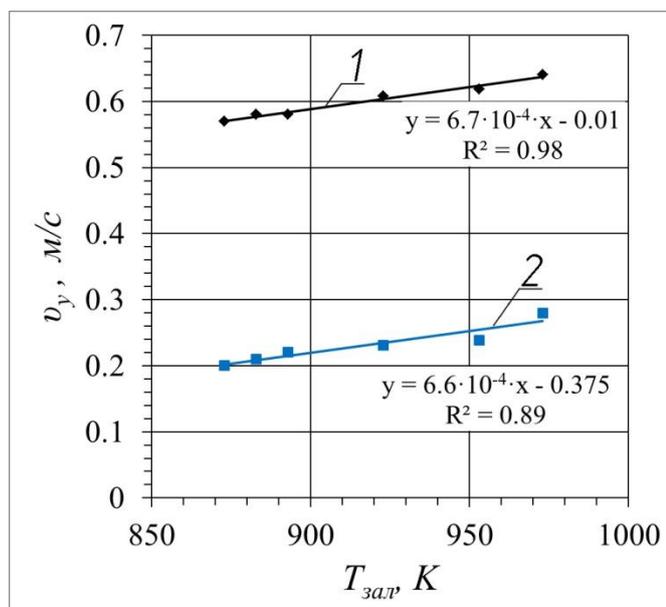


Рисунок 4.7 – Зависимость максимальной скорости  $v_y$  в восходящих потоках от температуры  $T_{зал}$  по модели с переменной вязкостью: 1–при 25% заполнении отливки; 2–65% заполнении отливки

Для уточнения зависимостей, представленных на рисунке 4.7 в части поведения расплава в форме при температурах в интервале кристаллизации воспользовались реологической моделью  $N|P$  (рисунок 1.24) и ее параметрами, определенными в разделе 2. Результаты данного исследования представлены на рисунке 4.8.

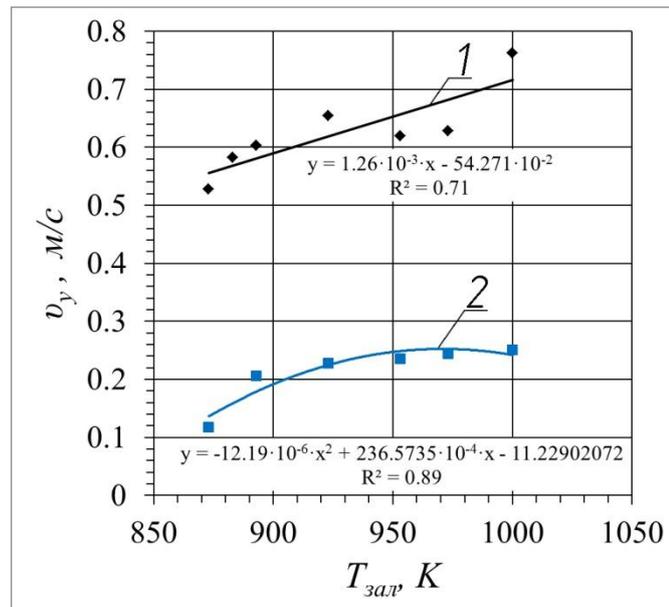


Рисунок 4.8 – Зависимость максимальной скорости  $v_y$  в восходящих потоках от температуры  $T_{зал}$  по упруго-вязкопластической модели: 1 – при 25% заполнении отливки; 2 – 65% заполнении отливки

Согласно полученным данным (рисунок 4.8) повышение температуры  $T_{зал}$  в диапазоне от 873К до 1000К приводит к увеличению скорости  $v_y$  в восходящих потоках на 18% и 46% при меньшем (степень заполнения 25%) и большем уровне (65%) расплава в формообразующей полости формы, соответственно.

Проведя сравнительный анализ рисунков 4.7 и 4.8, можно сделать вывод о том, что для моделирования процесса гравитационной заливки форм достаточным условием является использование модели с переменной, зависящей от температуры, вязкостью.

#### 4.1.2 Исследование работы дополнительных элементов литейной формы

Если требования к отливке не допускают присутствия в ее теле значительного количества оксидных включений, то в качестве мест их сосредоточения мо-

гут выступать дополнительные элементы – технологические напуски или промывники, располагаемые на нижнем уровне формообразующей полости кокиля и соединенные с последней. Их конструкция должна обеспечивать поступление первых наиболее загрязненных порций расплава, снижать вероятность (а лучше полностью исключать) вынос оксидов в формообразующую полость при ее дальнейшем заполнении.

Рассмотрим начальный этап формирования отливки «Поршень» при подводе расплава через стояк диаметром 8 мм (рисунок 4.9). Как уже отмечалось, в этот период времени, в виду возмущенного заполнения чаш (рисунок 4.9 а) и разбрызгивания металла в формообразующей полости (рисунок 4.9 б, в), течение расплава будет сопровождаться интенсивным окислением.

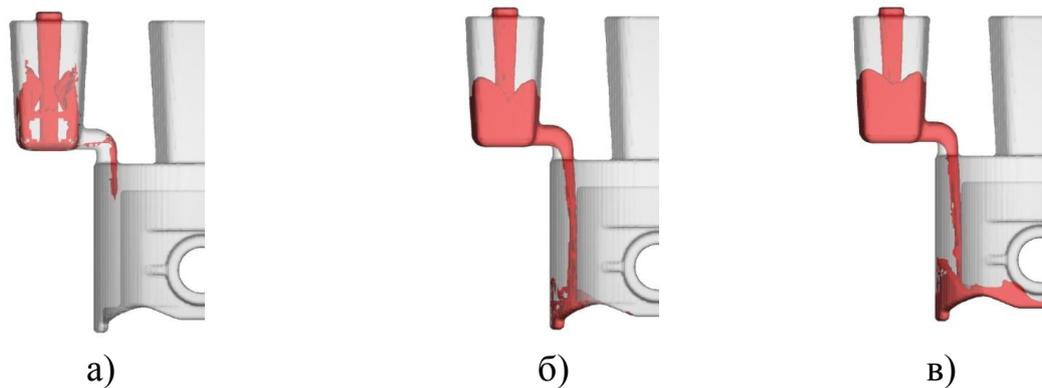


Рисунок 4.9 Начальная фаза заполнения формообразующей полости при использовании стояка диаметром 8 мм: а– $t=0.15$  с; б–  $t=0.44$  с; в–  $t=0.59$  с

Оценка вероятности перераспределения оксидов выполненная в пункте 4.1.1.1 показала, что при силе  $N$  удара струи, соответствующей стояку диаметром 8мм, скорость в восходящих потоках будет значительной. С целью предотвращения выноса продуктов окисления в уплотняющую (наиболее нагруженную часть отливки) в конструкцию литниковой системы были внесены дополнительные элементы (промывники) (рисунок 4.10).

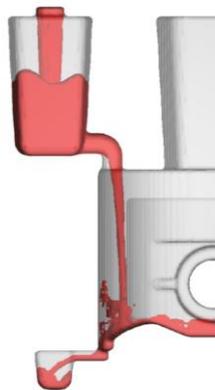


Рисунок 4.10 – Начальная фаза заполнения формообразующей полости с использованием промывников

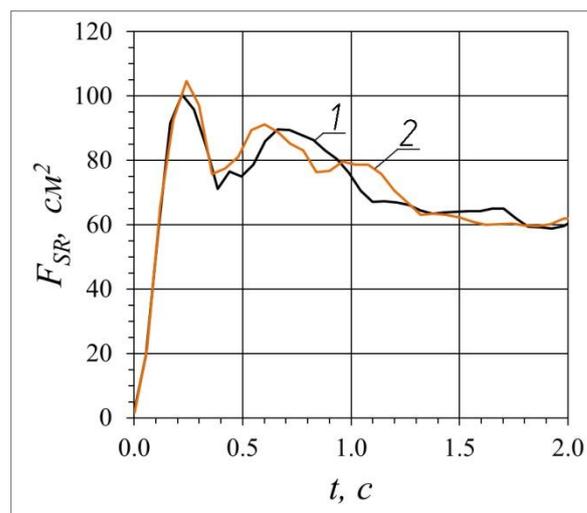


Рисунок 4.11 – Кинетика изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности на этапах I и IIa: 1 – конструкция литниковой системы без промывников; 2 – с промывниками

Из рисунка 4.10 видно, что промывники обеспечивают лишь частичное сосредоточение загрязнений, что подтверждается и результатами анализа кинетики изменения площадей свободной поверхности расплава (рисунок 4.11). При заливке кокиля имеющего дополнительные элементы литниковой системы, кривая изменения площади свободной поверхности (рисунок 4.11, кривая 2), а следовательно и загрязненность отливки, мало отличается от аналогичной кривой, полученной при заполнении формы без использования промывников (кривая 1). Это говорит о неэффективности их применения при такой геометрии отливки и выбранном способе соединения с формообразующей полостью.

Для повышения эффективности работы промывников в геометрию «Поршня» были внесены изменения, которые позволили обеспечить отсутствие существенных возмущений свободной поверхности расплава в формообразующей полости и, кроме того, последовательное заполнение промывников, а затем спокойное заполнение формообразующей полости (рисунок 4.12). При этом в промывниках может сосредотачиваться значительная часть оксидных включений, образующихся в литниковой чаше и других элементах литейной формы на этапе воз-

мущенного неустановившегося заполнения, определяемая объемом этих дополнительных элементов литейной формы.

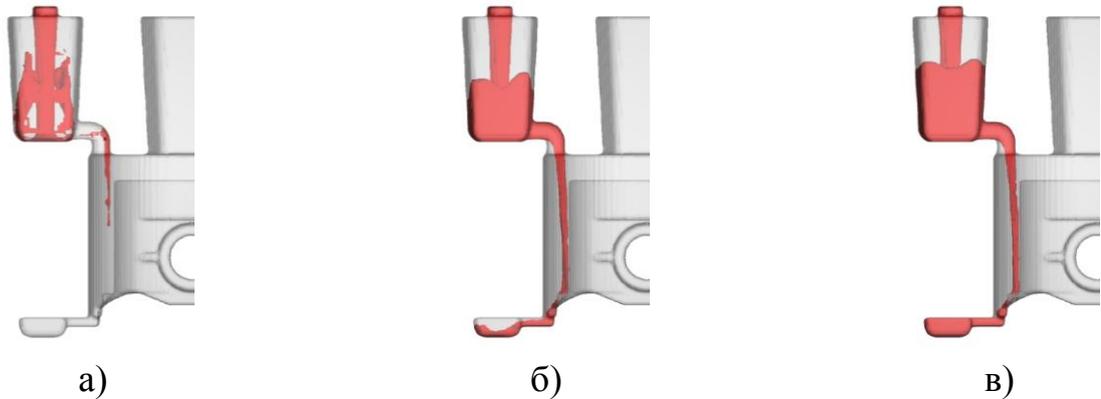


Рисунок 4.12 – Начальный этап заполнения формообразующей полости кокиля при измененной геометрии отливки: а– $t=0.15$  с; б–  $t=0.46$  с; в–  $t=0.68$  с

Для получения зависимостей, показывающих степень влияния промывников и их объема на содержание оксидных включений в отливке с измененной геометрией, были проведены дополнительные численные эксперименты. Их результаты представлены на рисунке 4.13, иллюстрирующем кинетику изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности.

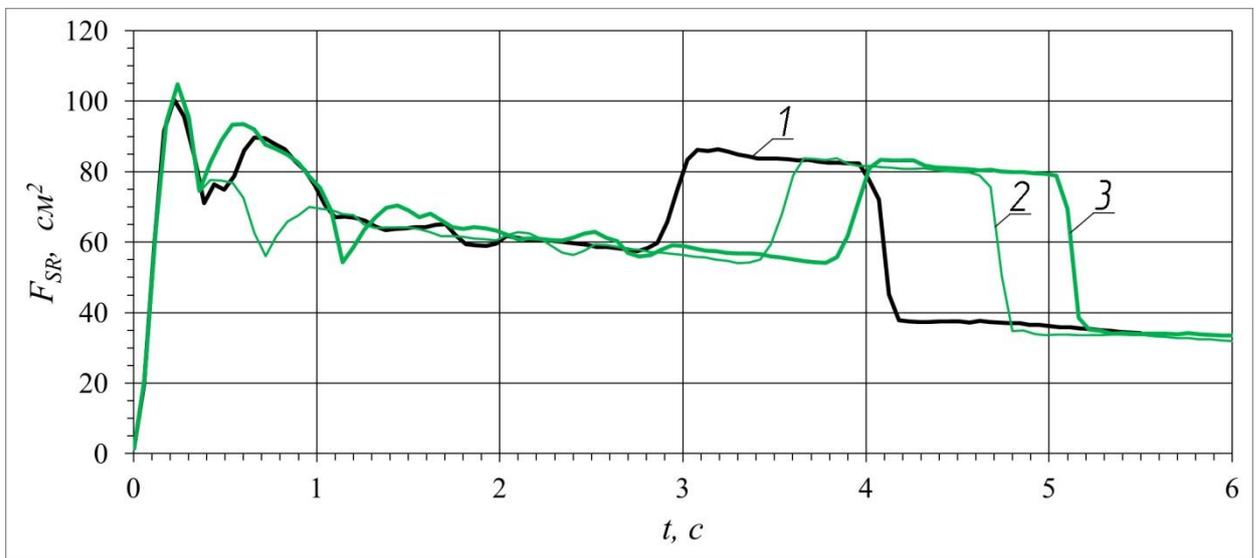


Рисунок 4.13 – Кинетика изменения площади  $F_{SR}$  свободной поверхности: 1– литниковая система без промывников; 2 – суммарный объем промывников  $V_{пр}=9,55\text{см}^3$ ; 3 – суммарный объем промывников  $V_{пр}=24,6\text{см}^3$

Совместный анализ результатов представленных на рисунках 4.12 (в) и 4.13 (кривая 2) показывает, что на этапе Па в конструкциях кокилей выполненных с

промывниками происходит заполнение именно этих дополнительных элементов литниковой системы.

При расчете критерия  $K_{OF}$  из рассмотрения были исключены периоды заполнения элементов литниковой системы (чаш – этап *I*, промывников – этап *IIa*), а также этапы заполнения *IIв* и *III* в виду ограниченности окислителя в форме. Это позволило произвести более точную оценку влияния объема промывников на процессы, происходящие в формообразующей полости, и загрязненность расплава оксидами. Результаты этого расчета представлены на рисунке 4.14.

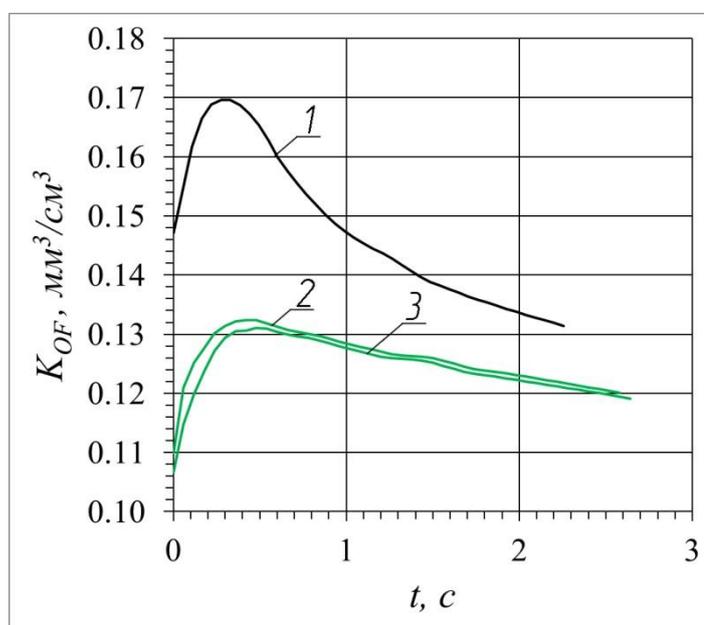


Рисунок 4.14 – Кинетика изменения критерия  $K_{OF}$ : 1 – кокиль без промывников; 2 – с промывниками суммарным объемом  $V_{\text{пр}}=9,55 \text{ см}^3$ ; 3 – с объемом  $V_{\text{пр}}=24,6 \text{ см}^3$

На рисунке 4.15 показано влияние объема промывников на максимальное значение критерия  $K_{OF}$  (рисунок 4.14). Из представленных данных (рисунок 4.14 и 4.15) следует, что промывники как малого объема ( $V_{\text{пр}}=9,55 \text{ см}^3$ ), так и большого ( $V_{\text{пр}}=24,6 \text{ см}^3$ ) в равной степени способствуют существенной стабилизации заполнения формообразующей полости и уменьшению критерия  $K_{OF}$  (рисунок 4.14, кривые 2, 3) по сравнению с заливкой кокиля без промывников (кривая 1).

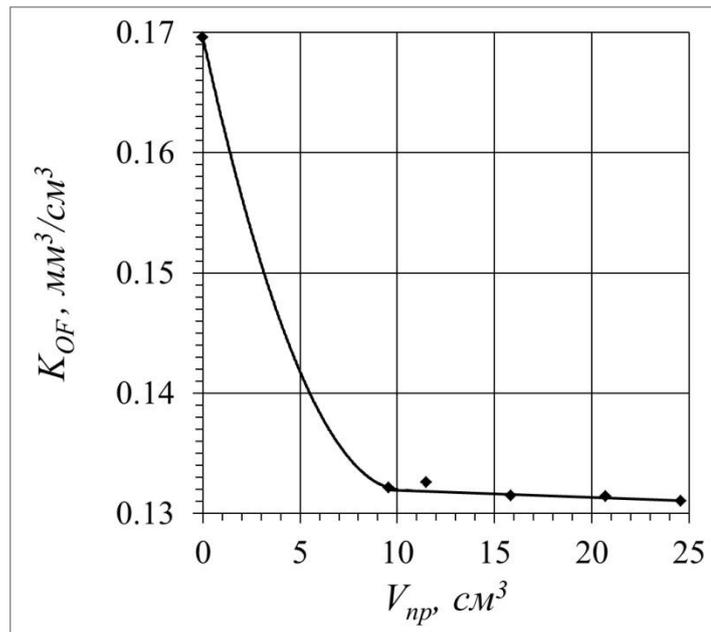


Рисунок 4.15 – Влияние объема промывников на максимальное значение критерия  $K_{OF}$

Для определения объема промывников, обеспечивающих наибольший положительный эффект был учтен объем расплава, поступившего в чаши и формообразующую полость за время первого этапа ( $\sim 0,5$  с, рисунок 4.13). Таким образом, суммарный объем этих элементов должен составлять  $V_{пр} = 15 \dots 20 \text{ см}^3$ . Использование промывников больших размеров приведет в основном к снижению  $K_{ИМ}$ . Так, если промывники не используются,  $K_{ИМ} = 54\%$ , при  $V_{пр} = 9,55 \text{ см}^3$  его значение составляет 53%, а при  $V_{пр} = 24,6 \text{ см}^3$  не превышает 50%. Некоторое положительное влияние увеличения объема промывников может быть ожидаемо в связи с уменьшением концентрации  $O_2$  в объеме формообразующей полости при более продолжительном их заполнении, а также стабилизацией свободной поверхности расплава в чашах.

Приведенные в данном разделе результаты позволяют сделать заключение о том, что основная часть оксидов образуется на начальном этапе заполнения формы, а последующие окислительные процессы протекают в условиях меньшей возмущенности свободной поверхности и концентрации  $O_2$ . Это снижает вероятность поражения наиболее ответственных частей отливки «Поршень» оксидными пленами и их фрагментами. Для предотвращения перераспределения оксидных включений по объему отливки необходимо соблюдать скоростной режим запол-

нения формы таким образом, чтобы скорость расплава в восходящих потоках имела как можно меньшее значение. Если содержание в отливке оксидных включений не допустимо, в качестве мест их сосредоточения могут использоваться промывники.

Результаты этих исследований представлены в работах [118, 119].

***Выводы по разделу:***

1. Критерий  $K_{OF}$  загрязненности отливки оксидными включениями обеспечивает возможность прогнозирования вероятного изменения содержания оксидов в материале отливок с изменением конструктивных и технологических параметров процесса их изготовления;

2. Критическое значение силы  $N_{кр}$  удара струи, полученное в работе [90] ( $N_{кр}=0,2Н$ ) может отличаться для реальных отливок более сложной конфигурации (для отливки «Поршень»  $N_{кр}=0,072 Н$ );

3. Из результатов исследований, выполненных в данном разделе, следует, что моделирование процесса гравитационной заливки форм может осуществляться с использованием модели с переменной, зависящей от температуры расплава вязкостью. Отметим, что моделирование с учетом упруго-вязкопластических характеристик расплава при оценке влияния температуры заливки на скорость в восходящих потоках дает разницу по сравнению с расчетом на вязкой модели  $\sim 10\%$  при перегреве расплава перед заливкой на  $50\dots 70К$  и около  $20\%$  при  $10\dots 20К$ .

4. Численные эксперименты показали, что требуемое качество отливки «Поршень», получаемой путем использования верхней заливки кокиля, обеспечивается, в том числе и в результате сосредоточения оксидов в ненагруженных частях отливки. Для повышения стабильности характеристик отливки, целесообразно использование промывников.

5. Эффективность применения промывников, задерживающих первые порции наиболее окисленного расплава, может быть оценена по критерию  $K_{OF}$ .

## 4.2 Разработка технологии изготовления отливки «Корпус 3»

Отливка «Корпус 3» (рисунок 4.16) электротехнического назначения. По техническим условиям ее изготовление допускается из сплавов АК12, и АК9, последний используют при необходимости осуществления упрочняющей термообработки. Как правило, на производстве отливку изготавливают из сплава АК9, контролируя его химический состав эмиссионным спектрометром «Аргон-5». Габаритные размеры «Корпуса 3» 119×80×52 мм, масса 0,380 кг, средняя толщина стенки 13 мм, в конструкции отливки предусмотрены ребра жесткости толщиной 4 мм. Получение данной детали с помощью литейной технологии осложняется наличием разнесенных тепловых узлов диаметром 16, 18 и 24 мм, затрудняющих обеспечение условий последовательного или равномерного затвердевания.



Рисунок 4.16 –Фотография отливки «Корпус 3»

Согласно техническим условиям отливка «Корпус 3» относится к группе 2Г отраслевого стандарта ОСТ23.4.50-73 [120], т.е. подвергается статическим нагрузкам. В связи с этим каждая отливка проходит испытания на прочность в специальной сертифицированной лаборатории в условиях, имитирующих условия эксплуатации.

Требования к прочностным характеристикам готового изделия определяют требования к технологии его изготовления, а следовательно к литниковой системе и другим параметрам процесса, которые должны обеспечивать минимальное содержание оксидных плен и усадочных дефектов в теле отливки, кроме того кокиль должен обладать минимальной металлоемкостью, быть удобным в обслуживании и надежным в эксплуатации.

Заводской кокиль металлоемкостью ~2,5 кг предусматривает одновременное получение двух отливок. На рисунке 4.17 показано положение отливки в форме с указанием мест подвода расплава и расположения прибыли.

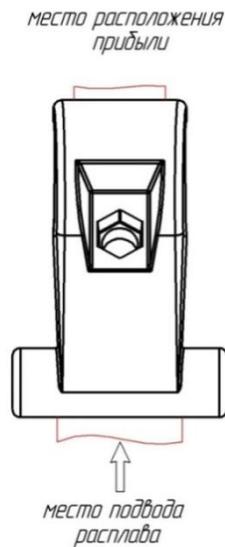


Рисунок 4.17 – Эскиз положения отливки в заводском кокиле с указанием мест подвода и питания

Согласно результатам численного моделирования процесс заполнения заводского кокиля характеризуется следующими основными этапами: I – начальный возмущенный этап заполнения формы; II – установившееся заполнение формообразующей части рабочей полости кокиля; III – заполнение прибыльной части формы и литниковой чаши (рисунок 4.18).

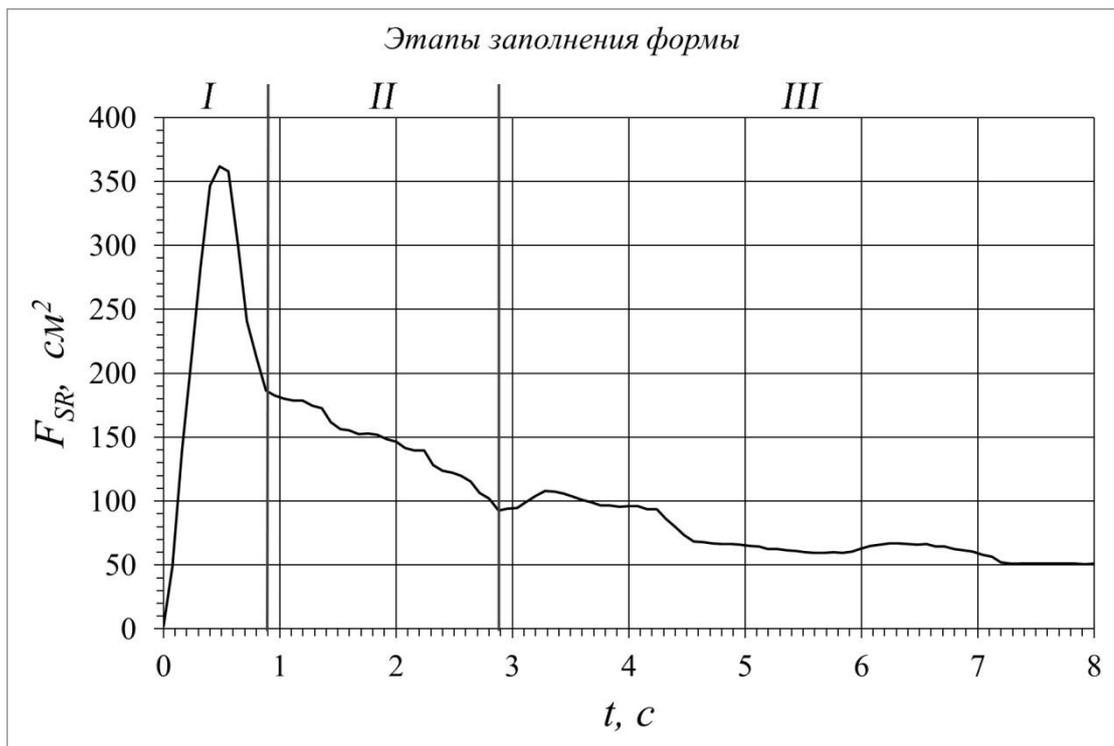


Рисунок 4.18 – Кинетика изменения свободной поверхности расплава при заполнении кокиля заводской конструкции: I – начальный возмущенный этап заполнения формы; II – этап установившегося заполнения формообразующей части рабочей полости кокиля; III – этап заполнения прибыльной части формы и литниковой чаши

Учитывая, что при попадании расплава на дно чаши происходило его разбрызгивание и выплескивание (подобное наблюдалось и в производственных условиях), при моделировании струю направляли в центр чаши, то есть непосредственно в стояк. Однако, применение стояка диаметром 25 мм и отсутствие верхнего дросселирования приводило к тому, что чаша не заполнялась, а в стояке происходило течение свободнопадающей струи расплава. При таком характере заполнения, достигая коллектора, расплав распадался на два потока, что сопровождалось его интенсивным разбрызгиванием, а на последующих этапах заполнения формы существенным возмущением свободной поверхности. Как итог такого подвода расплава в формообразующие полости формы, его скорость  $v_y$  на выходе из питателя превышала 1 м/с, что вызывало эффект фонтанирования в формообразующей полости (рисунок 4.19 а). По мере заполнения формы фонтанирование прекращалось (рисунок 4.19 б). Так протекал начальный этап заполнения формы.

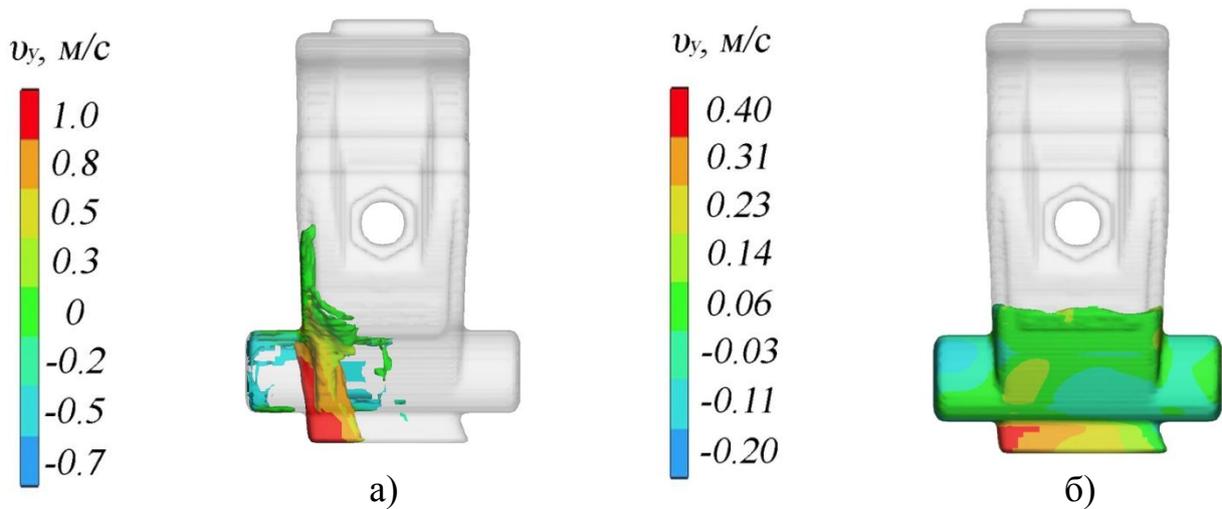


Рисунок 4.19 – Распределение скоростей  $v_y$  в восходящих потоках при заполнении заводского кокиля: а – этап I, возмущенное заполнение; б – начало этапа II установившегося заполнения формообразующей полости

Дальнейшее заполнение формообразующей полости происходило без значительных возмущений свободной поверхности (рисунок 4.20 а, б). Вместе с тем, существенные положительные скорости  $v_y$  в восходящих потоках способствуют выносу оксидов в нагруженную часть отливки. Этот этап завершается формированием прибыли и заполнением литниковой чаши.

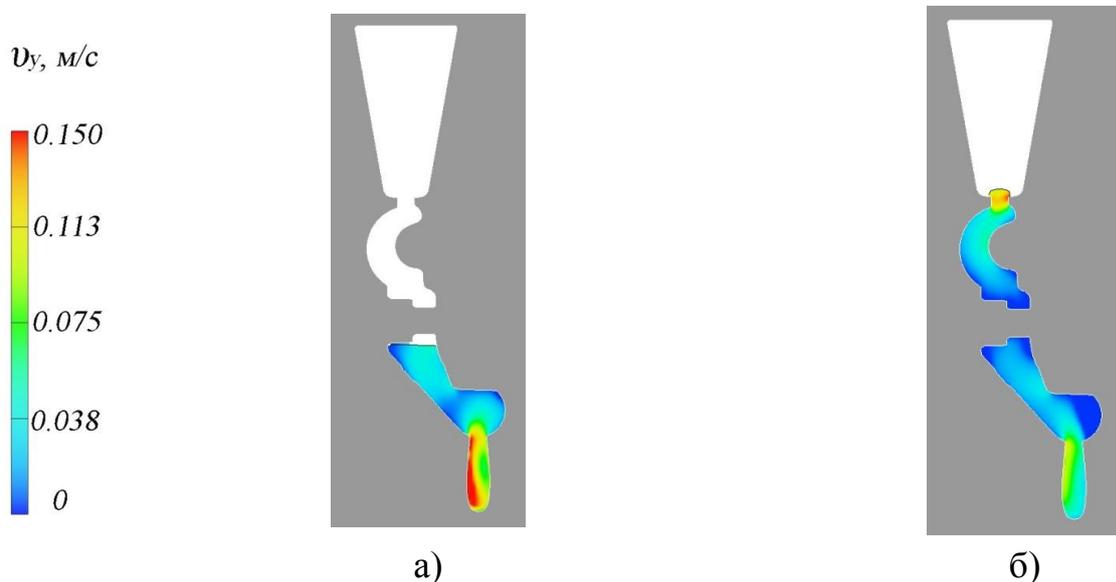


Рисунок 4.20 – Распределение скоростей  $v_y$  в восходящих потоках на II этапе заполнения формы : а – 50% заполнение формообразующей полости; б – 100% заполнение

Зависимость степени загрязненности ( $K_{OF}$ ) отливок оксидными включениями от массового расхода  $M_p$  поступающего в форму расплава представлена на рисунке 4.21.

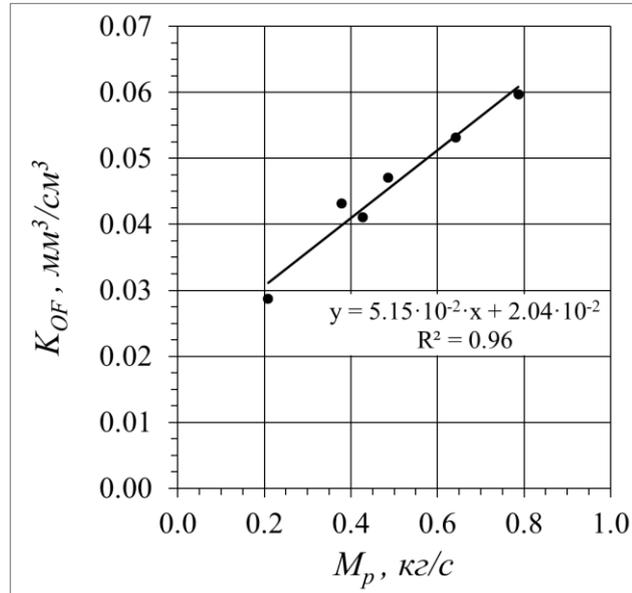


Рисунок 4.21 – Зависимость степени загрязненности ( $K_{OF}$ ) материала отливки «Корпус 3» от массового расхода  $M_p$  при использовании заводской технологии

Согласно полученным данным (рисунок 4.21), заводская технология не обеспечивает получение отливок стабильного качества. При увеличении расхода критерий  $K_{OF}$  может увеличиваться в два раза. При этом, конструкция литниковой системы не оснащена никакими средствами предотвращения попадания разрушенных оксидных плен в формообразующую полость формы.

Для проверки вероятности перераспределения оксидных включений в отливке произвели оценку скорости в восходящих потоках  $v_y$  от массового расхода  $M_p$  на момент 50% заполнения объема формообразующей полости и при завершении формирования отливки. Результат этого анализа показывает (рисунок 4.22), что в первом случае, скорость резко увеличивается при  $M_p=0,5$  кг/с (кривая 1), а во втором – скорость в нижних слоях не превышает 0,2 м/с даже при расходе  $M_p=0,8$  кг/с (кривая 2). Из этого следует, что получение годных отливок по такой технологии достигалось при заполнении формы с малыми стабильными расходами, что трудно обеспечить при ручной заливке и литниковой системе рассматриваемой конструкции.

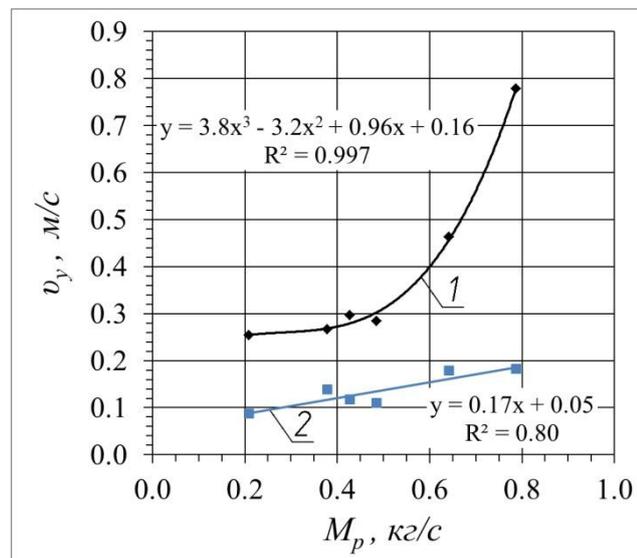


Рисунок 4.22 – Зависимость максимальной скорости  $v_y$  в восходящих потоках в нижних сечениях отливки от расхода  $M_p$ : 1– при 50 % заполнении формообразующей полости; 2 – при 100% заполнении формообразующей полости

Дополнительный анализ векторного поля скоростей  $v_y$  в расплаве на момент начала (рисунок 4.23) и завершения (рисунок 4.24) заполнения формообразующей полости иллюстрирует наличие в потоке циркуляции, что является дополнительным фактором, влияющим на перераспределение оксидов и их вынос в подприбыльные нагруженные части отливки.

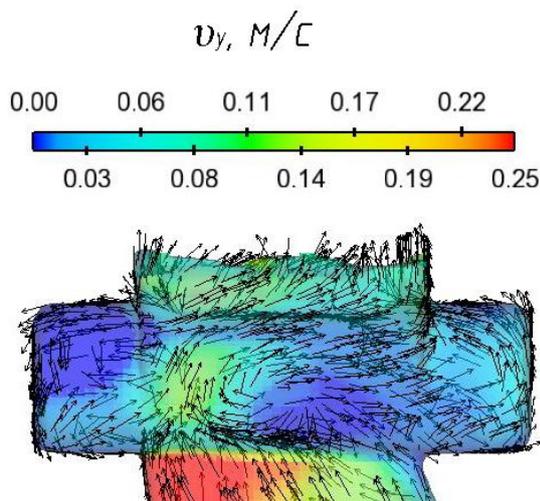


Рисунок 4.23 – Векторное поле скоростей в начале этапа II установившегося заполнения формообразующей полости

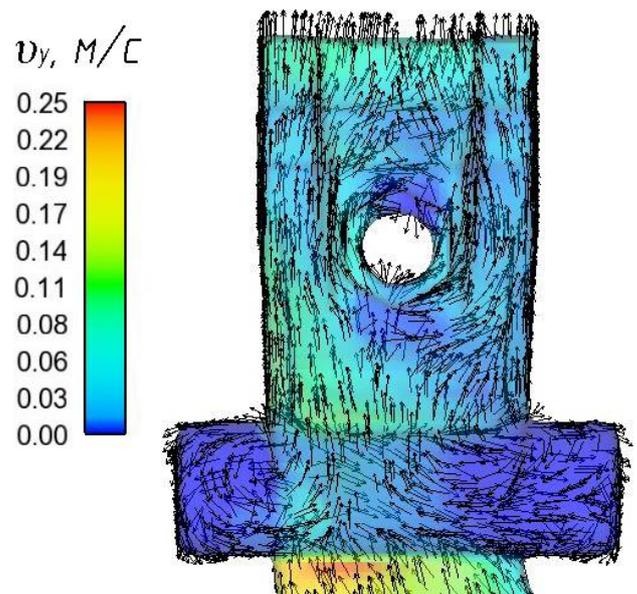


Рисунок 4.24 – Векторное поле скоростей в момент завершения II этапа заполнения формообразующей полости

Выше указывалось, что продукты окисления, присутствующие в расплаве в виде плен и их фрагментов, оказывают существенное негативное влияние на процесс питания затвердевающей отливки. Следствием этого, является повышение ее пористости, снижение механических свойств (прочности  $\sim$  на 10%, а относительного удлинения в 1,5...2 раза [1...3]) и других служебных характеристик. Альтман М.Б. показал [4], что существенное снижение механических свойств происходит при достижении пористости, соответствующей 4 и 5 баллам по шкале ВИАМ.

Для оценки вероятности образования дефектов усадочного происхождения при изготовлении отливок по заводской технологии, было выполнено моделирование процесса кристаллизации. Результаты этого моделирования представлены на рисунке 4.25 (а), где показаны области наиболее вероятного сосредоточения макропористости. Таким образом, в случае применения заводской технологии велика вероятность образования дефектов в ответственных частях отливки, которые определяют ее механические характеристики по прочности и пластичности, а также получение заготовок с пористостью (максимальная пористость 10,0...35% - область красного цвета, а минимальная около 2,5% - синяя область), превышающей значения, регламентируемые шкалой ВИАМ [29]. То, что прогноз образования макропористости был сделан достаточно точно, подтверждается темплетом отливки, представленными на рисунке 4.25 (б), полученным с использованием электроэрозионной обработки и шлифовальной машины Neris, а также результатами испытаний.

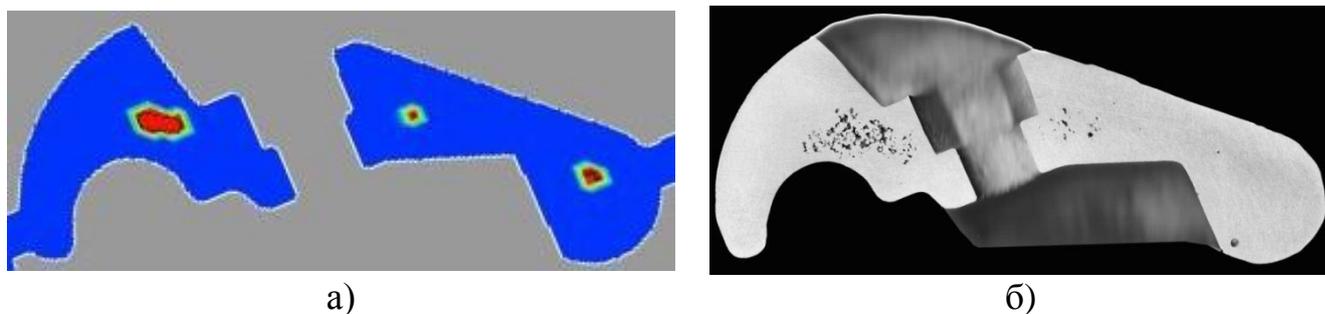


Рисунок 4.25 – Макропористость отливки «Корпус 3», полученной по заводской технологии : а – результаты моделирования; б – фотография макрошлифа, выполненного по ГОСТ 1583-93 [29]

Исследование технологии изготовления отливки «Поршень» с использованием модели расплава с переменной, зависящей от температуры вязкостью, показало, что положительный результат применения верхнего подвода расплава при литье в кокиль отливок ответственного назначения из легкоокисляющихся сплавов возможен путем сосредоточения оксидных включений в ненагруженных частях отливки либо в дополнительных элементах литниковой системы. Учитывая эти факты при разработке нового технологического процесса для изготовления отливки «Корпус 3» по заказу АО «Электросетьстройпроект», было принято решение использовать верхний подвод расплава (рисунок 4.26).

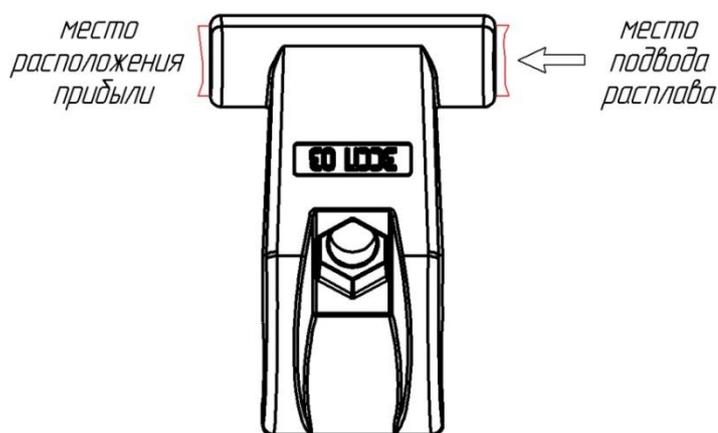


Рисунок 4.26 – Эскиз положения отливки в кокиле новой конструкции с указанием мест подвода и питания

Заполнение кокиля новой конструкции происходит в четыре этапа (рисунок 4.27).

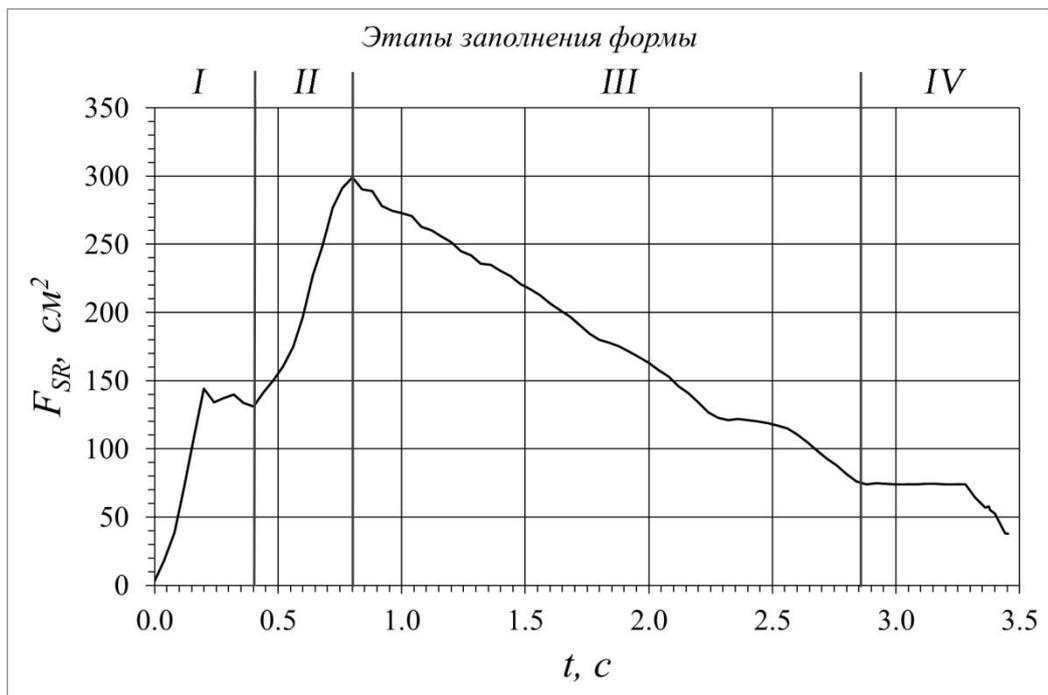


Рисунок 4.27 – Кинетика изменения свободной поверхности расплава при заполнении кокиля новой конструкции: I – заполнение чаши и стояка; II – начальное заполнение формообразующей полости III – дальнейшее заполнение формообразующей полости; IV – заполнение прибыльной части формы

Первый этап начинается с возмущенного заполнения чаши, а завершается улавливанием первых загрязненных порций расплава в зумпфе, расположенном в нижней части стояка. Затем расплав начинает поступать в формообразующую часть рабочей полости формы (этап II, рисунок 4.28), в это же время свободная поверхность расплава в чаше стабилизируется. Из-за применения верхнего подвода резкого снижения площади свободной поверхности при заполнении формообразующей полости кокиля (этап III, рисунок 4.29) не происходит. Вместе с тем, при заполнении формообразующих полостей на 20-30% окисление расплава и сосредоточение оксидов в зумпфе и ненагруженных частях отливки завершается. На четвертом этапе заполняются прибыльные части литниковой системы.

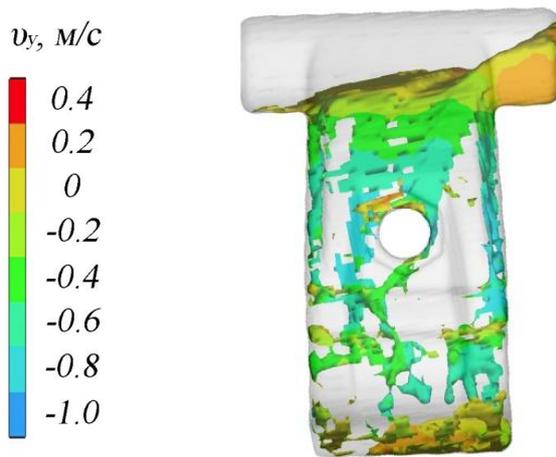


Рисунок 4.28 –Этап II. Начало заполнения формообразующей полости

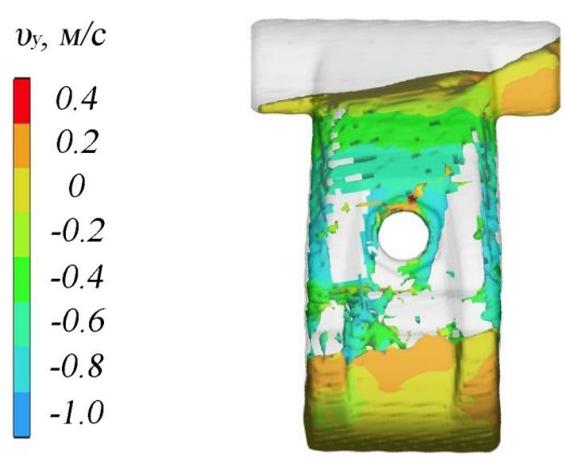


Рисунок 4.29 –Этап III. Продолжение заполнения формообразующей полости

Влияние массового расхода  $M_p$  расплава, поступающего в кокиль, на загрязненность материала отливки ( $K_{OF}$ ) приведено на рисунке 4.30.

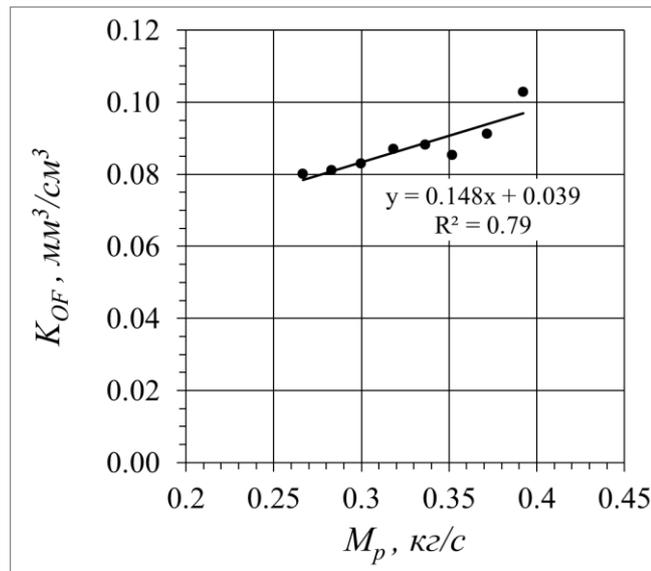


Рисунок 4.30 –Зависимость степени загрязненности ( $K_{OF}$ ) материала отливки «Корпус 3» от массового расхода  $M_p$  при использовании новой технологии

Из анализа зависимостей критерия  $K_{OF}$  для рассматриваемых литниковых систем от массового расхода  $M_p$  следует, что заполнение формы на начальном этапе при использовании нового варианта системы происходит при большем возмущении свободной поверхности (рисунки 4.21, 4.30). Однако, как было отмечено выше, при такой системе оксиды в основном могут сосредотачиваться в нижних частях формообразующих полостей и зумпфе, Надежность этого сосредоточения будет зависеть от скорости  $v_y$  в восходящих потоках.

В период, когда формообразующая полость заполнена на  $\approx 50\%$  скорость  $v_y$  при применении новой технологии в  $\sim 5$  раз ниже, чем при применении кокиля заводской конструкции (рисунки 4.22, 4.31 кривые 1). Скорость  $v_y$  при завершении III этапа отличается почти на порядок (рисунки 4.22, 4.31 кривые 2). Таким образом, при использовании новой технологии обеспечиваются условия для сосредоточения оксидов в местах формообразующих полостей, заполняемых первыми. Ограничения по соблюдению требуемого для этого массового расхода расплава  $M_p < 0,35$  кг/с, обеспечиваются путем его дросселирования на выходе из литниковой чаши.

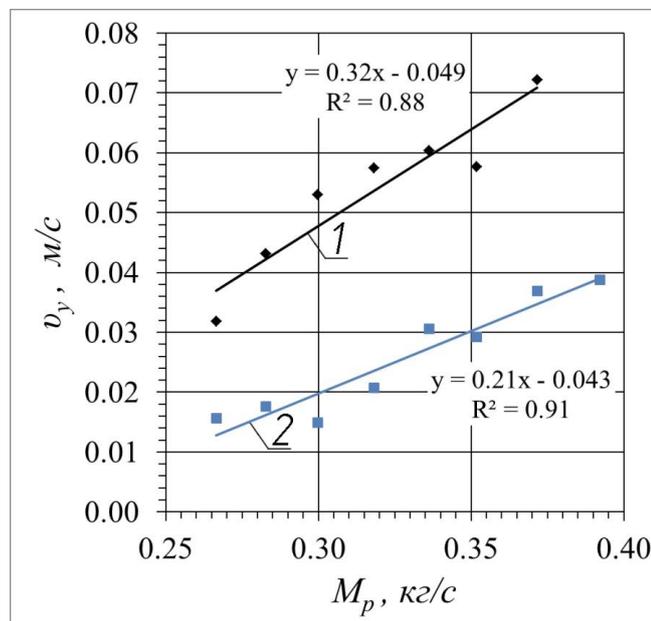


Рисунок 4.31 – Зависимость максимальной скорости  $v_y$  в восходящих потоках в нижних сечениях отливки от расхода  $M_p$ : 1 – при 50 % заполнении формообразующей полости; 2 – при 100% заполнении формообразующей полости

Также было выполнено моделирование процессов кристаллизации отливок, полученных согласно новой технологии, результаты которого представлены на рисунке 4.32 (а) и (б) соответственно, где показаны области наиболее вероятного сосредоточения макро пористости. В отливке, полученной по новой технологии, усадочные дефекты сосредотачиваются в менее ответственных частях и не влияют на эксплуатационные свойства (пористость в малонагруженной части отливки 4,5...7,3% - область красного цвета и менее 2,5% - область синего цвета). Послед-

ний результат в целом соответствует 3...4-му баллу пористости по шкале ВИАМ [10], Данный прогноз образования макро пористости также подтверждается темплетом, представленным на рисунке 4.32 (б) и результатами заводских испытаний [119].

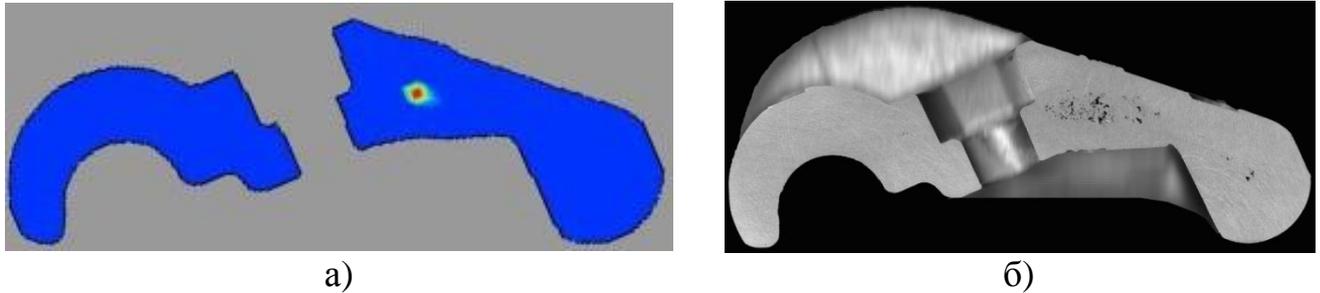


Рисунок 4.32 – Макропористость отливки «Корпус 3», полученной по новой технологии : а – результат моделирования; б – фотография макрошлифа, выполненного по ГОСТ 1583-93 [29]

Итогом данной работы стало практически полное исключение брака отливок. Коэффициент  $K_{им}$  использования металла с 31% (заводская технология) был повышен до 65% (приложения Б, В).

***Выводы по разделу:***

1. Критерий  $K_{OF}$  не в полной мере позволяет производить сравнительную оценку литниковых систем разного типа (при верхней литниковой системе прогноз по загрязненности отливок чаще всего выше по сравнению с нижним подводом). Вместе с тем, при сравнении технических решений, предполагающих использование литниковых систем одного типа, точность прогнозирования повышается и существенно сокращается продолжительность поиска оптимального варианта технологического процесса.

2. Для сравнительного анализа эффективности использования литниковых систем разных типов необходимо использовать комплексное сравнение, например, сопоставив значения  $K_{OF}$ , целесообразно выполнить дополнительную оценку вероятности сосредоточения оксидов в заданных частях отливки или дополнительных элементах литниковой системы. Так, например, для отливки «Корпус 3» скорость в восходящих потоках не должна превышать  $0,015 < v_y < 0,045$  м/с.

3. При использовании верхних литниковых систем обеспечение требуемых механических характеристик отливок может быть достигнуто путем сосредоточения оксидных плен и их фрагментов в тех ее частях, которые не оказывают существенного влияния на механические свойства отливки в целом или в «промыльниках».

### 4.3 Разработка технологии изготовления отливки «Луч»

«Луч» (рисунок 4.16) – литая деталь электротехнического назначения, которая изготавливается из сплава АК9ч. Ее габаритные размеры 202×80×67 мм, масса 0,440 кг. Как и к отливке «Корпус 3», к ее прочностным характеристикам предъявляются повышенные требования.



Рисунок 4.33 – Фотография отливки «Луч»

Заводской одногнездный кокиль имеет металлоемкость 1,87 кг, что при указанной массе получаемого изделия обеспечивает  $K_{\text{ИМ}} \sim 24\%$ . На рисунке 4.34 показано положение отливки в форме с указанием мест подвода расплава и расположения прибылей.

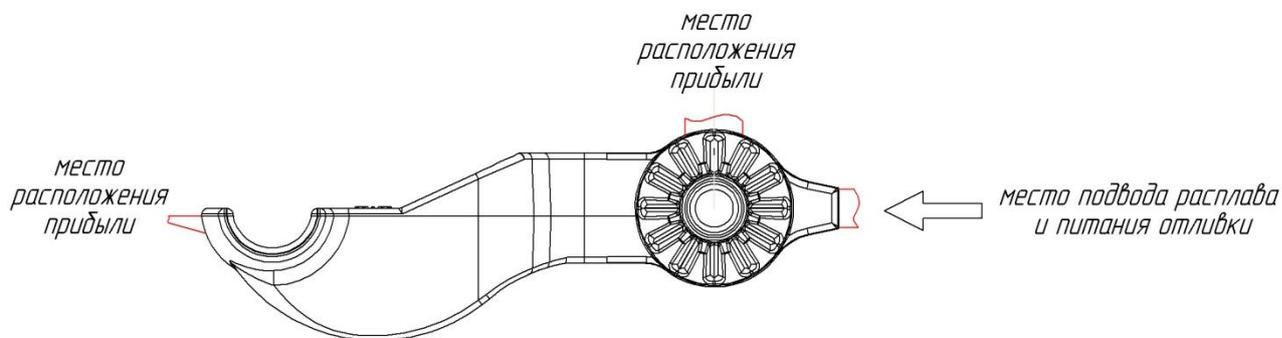


Рисунок 4.34 – Эскиз положения отливки в заводском кокиле с указанием мест подвода и питания

Литниковая система состоит из прямоугольной чаши  $70 \times 70$  и высотой 40 мм, прямого стояка и колодца диаметрами 20 и 32 мм, соответственно, расширяющегося к колодцу питателя  $10 \times 10$  мм и длиной 10 мм. Питание массивных узлов осуществляется через верхнюю ( $R_{\text{ГПР}}=8,6$  мм) и боковую ( $R_{\text{ГПР}}=11,0$  мм) прибыли.

При подводе расплава на донную поверхность чаши возникают сложности по поддержанию в ней постоянного уровня. Это обусловлено ее небольшой высотой (увеличение расхода поступающего в чашу расплава может приводить к его выплескиванию) и высокой пропускной способностью стояка. Поэтому поступающую из заливочного устройства струю расплава при моделировании направляли непосредственно в стояк, что соответствует условиям заполнения формы на предприятии.

Численное моделирование заполнения данного кокиля показывает, что при выбранном положении отливки и месте подвода расплава течение в форме происходит со значительной площадью окисляемой поверхности. При этом в местах обтекания стержней происходит разбрызгивание и образование вторичных волн, что приводит к разрушению оксидных плен и замешиванию их фрагментов в материал отливки (рисунок 4.35).

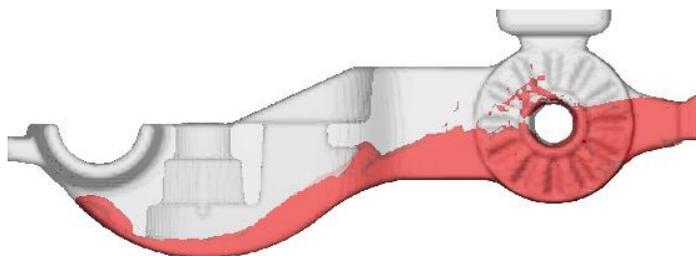


Рисунок 4.35 – Начальная фаза заполнения формообразующей полости заводского кокиля

Процесс заполнения формы характеризуется следующими основными этапами: I – заполнение элементов литниковой системы (течение расплава открытой струей в стояке, а также заполнение колодца); II – заполнение формообразующей части рабочей полости кокиля и боковой прибыли; III – заполнение верхней прибыли (рисунок 4.36).

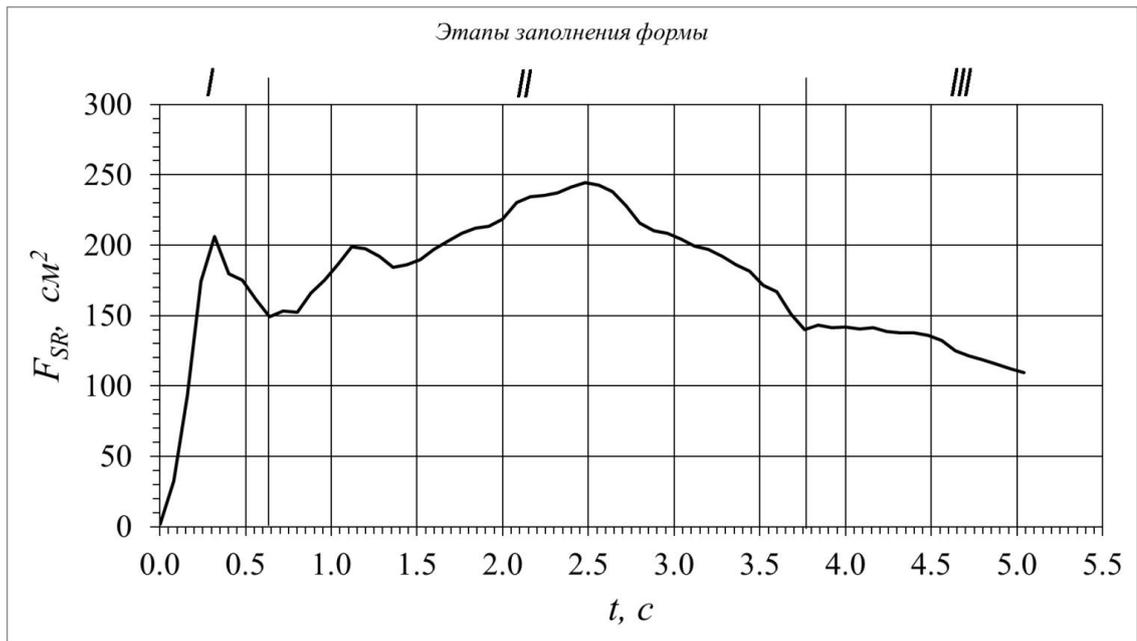


Рисунок 4.36 – Кинетика изменения свободной поверхности расплава при заполнении кокиля заводской конструкции: I – заполнение элементов литниковой системы; II – заполнение формообразующей части рабочей полости кокиля и боковой прибыли; III – заполнение верхней прибыли

Из анализа рисунка 4.36 также следует, что наибольшее количество оксидных включений будет образовываться непосредственно в формообразующей полости. Кроме этого, велика вероятность распределения этих включений по всему объему отливки.

При подаче расплава непосредственно в стояк обеспечение требуемого режима заполнения формы полностью зависит от квалификации кокильщика. Зависимость степени загрязненности отливок оксидными включениями ( $K_{OF}$ ) от расхода  $M_P$  поступающего в форму расплава представлена на рисунке 4.37.

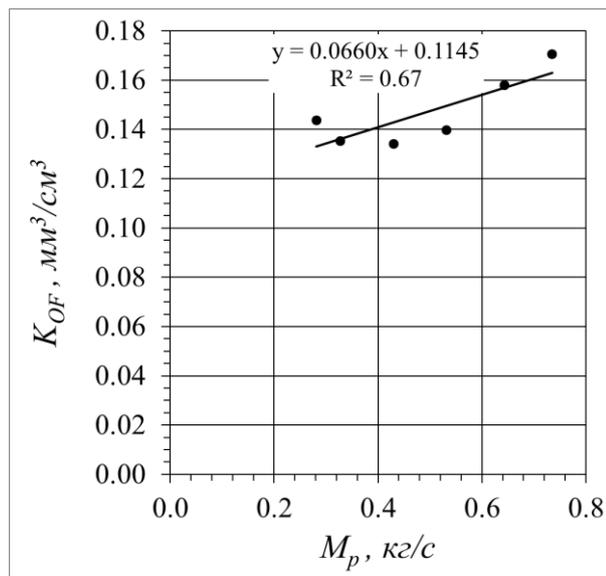


Рисунок 4.37 – Зависимость степени загрязненности ( $K_{OF}$ ) материала отливки «Луч» от массового расхода  $M_p$  при использовании заводской технологии

Анализ представленной зависимости (рисунок 4.37) и данные работы [19] (раздел 1.1) объясняют то, что процесс изготовления отливок по такой технологии, предусматривающий ручную заливку форм, отличается существенной нестабильностью прочностных характеристик изделия.

Эффективность работы прибылей была оценена посредством анализа макропористости (рисунок 4.38) (максимальная пористость 10,0...35% - область красного цвета, а минимальная ниже 2,5% - синяя область).

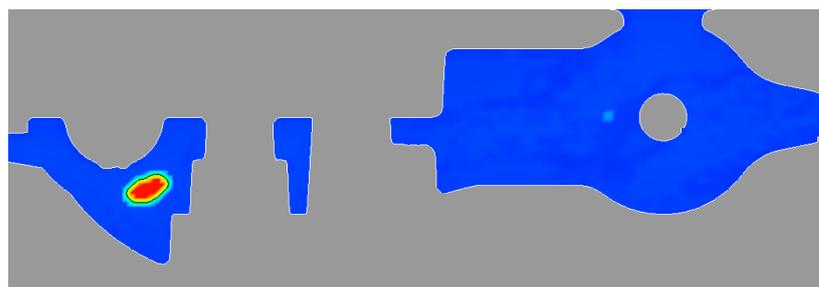


Рисунок 4.38 – Результат моделирования, иллюстрирующий места сосредоточения макропористости в отливке «Луч» при применении заводской технологии

Описанные выше недостатки заводской технологии были учтены при разработке кокиля новой конструкции.

Положение отливки в новом кокиле, а также место подвода расплава и расположения прибыли показаны на рисунке 4.39. При разработке новой технологии удалось сократить металлоемкость формы до 0,713 кг и повысить  $K_{ИМ}$  до 62 %.

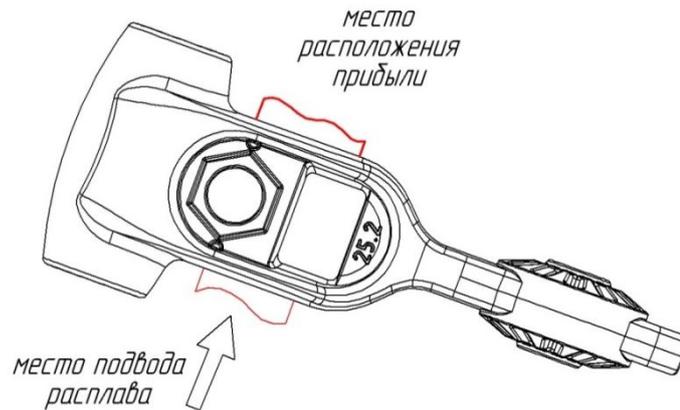


Рисунок 4.39 – Эскиз положения отливки в кокиле новой конструкции с указанием мест подвода и питания

Расплав из конической наростной литниковой чаши объемом  $105 \text{ см}^3$  поступает в зигзагообразный стояк диаметром 12 мм плавно переходящий в коллектор. Наклонное положение отливки в форме обеспечивает стекание первых наиболее загрязненных порций расплава из питателя в менее ответственные части будущего изделия (рисунок 4.40).

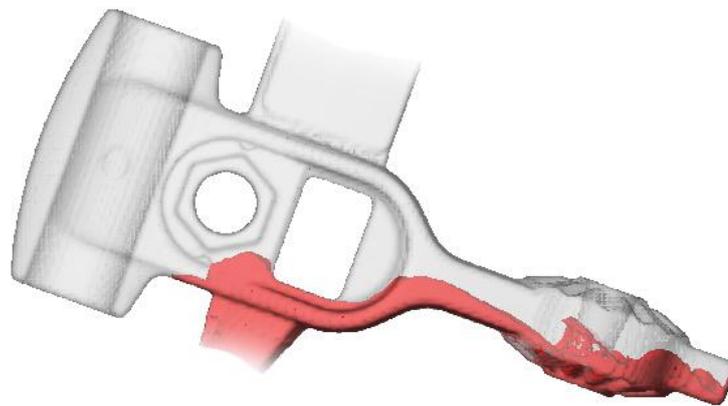


Рисунок 4.40 – Начальная фаза заполнения формообразующей полости кокиля новой конструкции

На рисунке 4.41 показана кинетика изменения площади свободной поверхности расплава при заполнении кокиля новой конструкции.

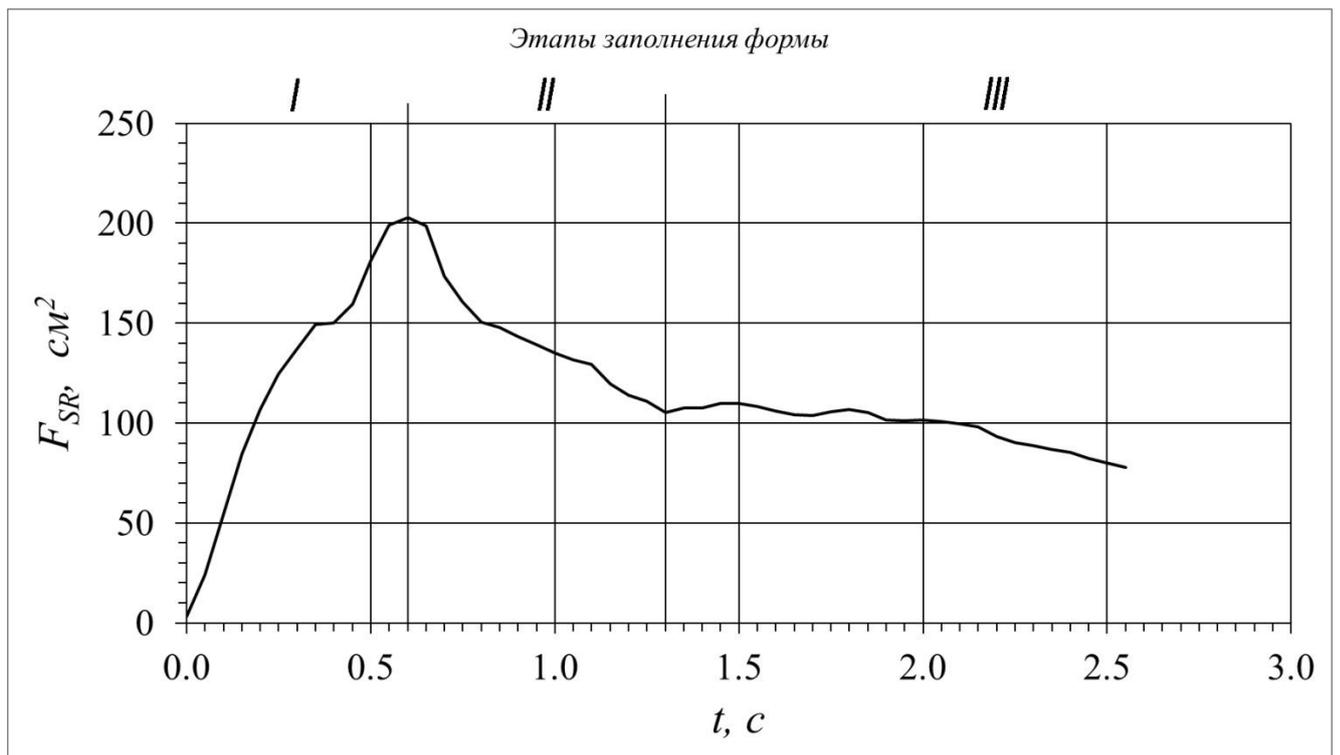


Рисунок 4.41 – Кинетика изменения свободной поверхности расплава при заполнении кокиля новой конструкции: I – начальный возмущенный этап заполнения формы; II – переходный этап; III – этап установившегося течения

Из представленной зависимости видно, что на начальном этапе заполнения площадь свободной поверхности расплава всё время растёт, достигая максимального значения в конце этапа. Затем течение происходит с постепенным сокращением площади подверженной окислению (этап 2). При завершении формирования отливки и заполнении прибыльной части кокиля течение происходит при минимальном значении этого параметра. Таким образом, подтверждается высказанное предположение по обеспечению поступления наиболее окисленного расплава в места отливки заполняемые первыми.

Также был произведен анализ влияния расходной характеристики на загрязненность изготавливаемой детали оксидными включениями.

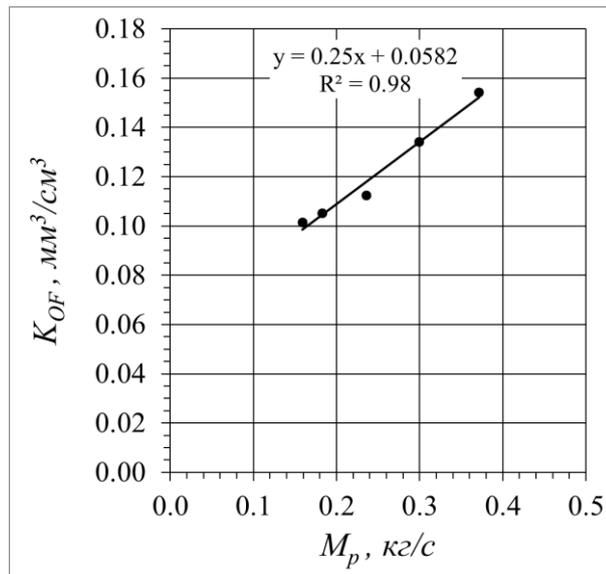


Рисунок 4.42 – Зависимость степени загрязненности ( $K_{OF}$ ) материала отливки «Луч» от массового расхода  $M_P$  при использовании новой технологии

Рост загрязнений с увеличением расхода можно объяснить интенсивностью и длительностью возмущений расплава в литниковой чаше и других подводящих элементах литниковой системы. По этой причине в конструкции литниковой чаши было предусмотрено дросселирование расплава, которое исключало заполнение формы с  $M_P > 0,375$  кг/с.

Для снижения вероятности попадания в отливку фрагментов оксидных плен, образующихся в каналах и полостях литниковой системы, в конце коллектора предусмотрен зумпф, принимающий загрязненный расплав. Кроме того, для приема наиболее окисленного металла из формообразующей полости использовали промывник (рисунок 4.43, рисунок 4.44).

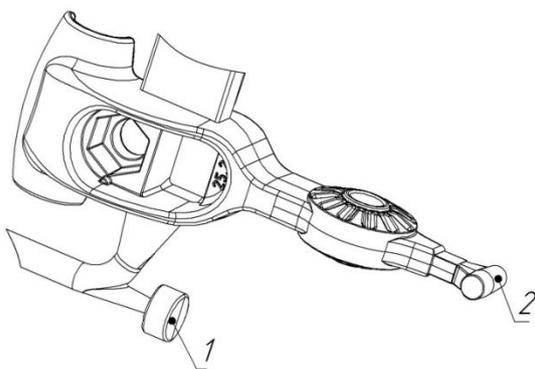


Рисунок 4.43 – Место расположения зумпфа 1 и промывника 2 в кокиле новой конструкции

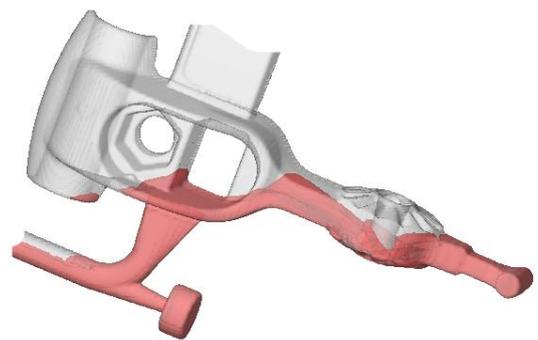


Рисунок 4.44 – Начальный этап заполнения формообразующей полости при использовании зумпфа и промывника

Питание тепловых узлов реализуется по принципу обеспечения равномерной кристаллизации. Прибыль с приведенным размером 5,8 мм и объемом 64,1 см<sup>3</sup> расположена напротив питателя, осуществляющего подвод расплава в элементы отливки тонкого сечения, расположенных между двумя массивными тепловыми узлами. Таким образом, после завершения заполнения формообразующей полости расплав из питателя продолжает поступать в прибыль, обеспечивая тем самым дополнительный прогрев элементов литейной формы, оформляющих тонкие сечения отливки и выравнивание продолжительности затвердевания расплава по объему формообразующей полости.

Результат моделирования кристаллизации отливки выполненной по новой технологии показан на рисунке 4.45 (максимальная пористость 5,0...7,3% - область красного цвета, а минимальная ниже 2,5% - синяя область).

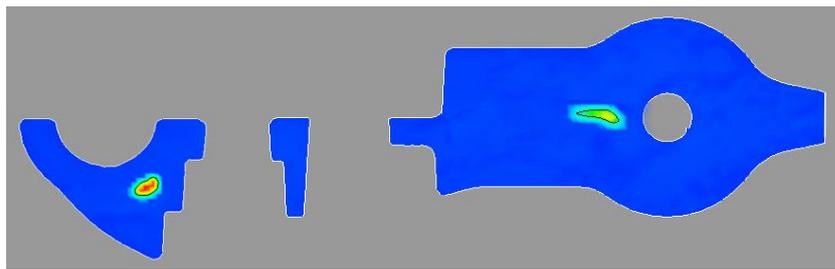


Рисунок 4.45 –Результат моделирования иллюстрирующий места вероятного сосредоточения макро пористости в отливке «Луч» при применении новой технологии

Полный цикл заводских испытаний подтвердил правильность принятых проектных решений.

Вместе с этим, по разработанным (раздел 4.2 и 4.3) технологическим процессам (включая оснастку) было изготовлено более 250000 отливок каждого наименования. Доля проектных работ и оснастки в себестоимости отливок составила ~1,5%.

#### ***Выводы по разделу:***

1. Результаты использования разработанного технологического процесса для литой детали «Луч» в производственных условиях подтвердили правильность принятых технических решений, в том числе, и использования промывников в каналах литниковой системы (зумпф) и за формообразующей полостью.

## Выводы по главе 4

1. При выборе верхних ЛС необходимо:

- обеспечивать быстрое протекание окислительных процессов на начальном этапе заполнения формообразующей полости кокиля расплавом  $Al$  – сплава;
- создавать условия для сосредоточения оксидных плен и их фрагментов в частях отливки, заполняемых первыми, или в «промывниках»;
- конструкция отливки и ее положение в форме должны способствовать поступлению первых, наиболее загрязненных объемов расплава из литниковой системы, в промывники (при использовании последних);
- исключать вынос оксидов в основное тело отливки из мест их сосредоточения;

2. Критерий  $K_{OF}$  обеспечивает достаточно точное прогнозирование вероятности загрязненности отливки оксидами для технических решений, предполагающих использование литниковых систем одного типа.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Критерий  $K_{OF}$  загрязненности отливки оксидами обеспечивает прогнозирование возможного содержания в отливке таких включений по результатам численного моделирования процесса заливки кокилей в программах FLOW 3D или ProCAST. Достоверность этого прогнозирования подтверждена сравнительным анализом результатов численного моделирования с экспериментальными данными натуральных экспериментов, выполненных М.В. Шаровым и Н.М. Галдиным, а так же результатами его использования для решения практических задач.

2. Разработана методика определения реологических свойств расплава путем моделирования заливки стандартной спиральной пробы на жидкотекучесть (ГОСТ 16438-70) в программе FLOW 3D, сопоставлением результатов численного и натурального экспериментов и подбором требуемых реологических характеристик модели расплава.

3. Определены параметры реологической модели расплава (сплава АК9), позволяющие осуществлять моделирование процесса гравитационной заливки форм этим и подобными сплавами, в том числе, и при условии снятия перегрева до завершения заполнения формообразующей полости литейной формы.

4. При выборе положения отливки в форме, заливаемой с использованием нижних литниковых систем, необходимо стремиться к обеспечению минимального среднеинтегрального значения площади горизонтального поперечного сечения формообразующей полости.

5. Численными экспериментами и практическим использованием их результатов подтверждено, что при использовании верхних литниковых систем существуют скоростные ограничения заполнения формообразующей полости. Эти ограничения обусловлены степенью воздействия струи расплава на донную часть формы и зеркало расплава в ней. Это воздействие может быть оце-

нено по силе  $N$  удара струи и не должно превышать ее критического значения  $0,072 < N_{кр} < 0,2Н$ , зависящего от параметров литниковой системы и конфигурации отливки.

6. Обеспечение требуемых свойств отливок из алюминиевых сплавов, зависящих от степени загрязненности материала оксидными включениями, возможно путем сосредоточения продуктов окисления в промывниках или в тех частях отливки, которые не оказывают влияние на ее служебные свойства.

7. Численные эксперименты показали, что требуемое качество отливки «Поршень», получаемой путем использования верхней заливки кокиля, обеспечивается, в том числе и в результате сосредоточения оксидов в ненагруженных частях отливки. Для снижения вероятности выноса оксидов в уплотняющую часть «Поршня», повышения плотности, механических свойств, герметичности и стабильности характеристик отливки в целом, целесообразно использование промывников.

8. Практическим использованием результатов исследования подтверждена возможность использования предлагаемой методики расчета литниковых систем для кокильных фасонных отливок из алюминиевых сплавов.

## 5. СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$K_{им}$	– коэффициент использования металла
$K_{тм}$	– коэффициент точности массы
$\Delta m$	– прирост массы
$m_{отл}$	– масса отливки
$m_{лс}$	– масса литниковой системы
$m_{дет}$	– масса детали
$\sigma_{\sigma}$	– предел прочности на растяжение
$\sigma_{изг}$	– предел прочности на изгиб
$\delta$	– относительное удлинение
$C_B$	– концентрация оксидных включений
$T$	– температура
$\Delta T_{кр}$	– интервал кристаллизации
$T_{КР}$	– температура кристаллизации
$T_L$	– температура ликвидуса
$T_E$	– температура эвтектики
$T_S$	– температура солидуса
$T_{ОП}$	– температура остановки потока
$T_{\psi=15}$	– температура при доли твердой фазы 15%
СЭМ	– сканирующий электронный микроскоп
ЭДС	– энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия
$Q_{\phi}$	– расход расплава
$Q_{\phi min}$	– минимальный расход расплава
$Q_{\phi max}$	– максимальный расход расплава
$z$	– загрязненность расплава
$N$	– сила удара струи
$N_{кр}$	– критическая сила удара струи
$\rho$	– плотность
$\rho_1$	– плотность перегретого расплава
$\rho_2$	– плотность расплава в твердо-жидком состоянии
$r$	– радиус нижнего сечения стояка
$\mu$	– коэффициент расхода
$H$	– напор расплава в чаше
$h$	– высота падения струи до зеркала расплава
$\gamma$	– общая относительная деформация тела
$\tau$	– приложенное к телу напряжение
$G_1$	– модуль сдвига
$G, G_2$	– модуль упругого последействия
$\eta$	– коэффициент динамической вязкости
$\eta_1$	– пластическая вязкость

$\eta_2$	– псевдовязкость Кельвина
$\tau_s$	– предельное напряжение сдвига
$t$	– время
$t_0$	– время приложения нагрузки
$t_1$	– время снятия нагрузки
$t_2$	– время, при котором $\tau$ в упругом элементе модели достигает значения $\tau_s$
$t_3$	– продолжительность релаксации напряжений $\tau$ в упругом элементе модели
$Re$	– число Рейнольдса
$Re_{crit}$	– критическое значение числа Рейнольдса
$Re_{Шпит}$	– критическое значение числа Рейнольдса в питателе
$Re_{Школ}$	– критическое значение числа Рейнольдса в коллекторе
$Re_{Шст}$	– критическое значение числа Рейнольдса в стояке
$We$	– число Вебера
$We_{Ш}$	– критическое значение числа Вебера
$Fr$	– число Фруда
$K_{И}$	– комплексный критерий А. С. Мусияченко
$K_1$	– коэффициент, учитывающий влияние характеристик расплава, входящих в критерии $Re$ и $We$ , а также физико-механические свойства окисной пленки и шероховатость поверхности формы
$v$	– скорость расплава
$R_{ПП}$	– приведенный радиус струи
$K_{Ш}$	– критерий шлакообразования
$K_{Шпит}$	– критическое значение критерия шлакообразования
$K_{Школ}$	– критическое значение критерия шлакообразования
$K_{Шст}$	– критическое значение критерия шлакообразования
$h_n$	– толщина оксидной пленки на фронте потока
$l_o$	– характерный размер полости
$K_{\phi}$	– критерий фонтанирования расплава
$d_k$	– диаметр канала (струи), подводящего поток
$D_n$	– диаметр вмещающей расплав полости
$H_{nn}$	– высота предварительного наполнения формы
$K_{OF}$	– критерий загрязненности отливки оксидными включениями
$V_{SR}$	– объем оксидов, образующихся при заполнении формы
$V_o$	– объем отливки
$F_{SRi}$	– среднеинтегральная площадь свободной поверхности расплава
$F_{SR}$	– текущая площадь свободной поверхности расплава
$t_{зан}$	– продолжительность заполнения формы;
$h_P$	– средняя толщина оксидной пленки, образующаяся на поверхности $F_{SR}$
$d_{ст}$	– диаметр стояка
$d_{ст.в}$	– диаметр верхнего поперечного сечения стояка
$d_{ст.н}$	– диаметр нижнего поперечного сечения стояка
$h_{ст}$	– высота стояка

$n_{OK}$	– количество оксидных плен на единице площади
$F_{OK}$	– средняя площадь оксидных плен
$L_{OK}$	– число оксидных плен в единичном объеме
$V_{OK}$	– средний объем окислов в единичном объеме
$n_{Al_2O_3}$	– число молей оксида алюминия
$n_{O_2}$	– число молей кислорода
$m_{Al_2O_3}$	– масса оксида алюминия
$M_{Al_2O_3}$	– молярная масса оксида алюминия
$V$	– объем
$V_{O_2}$	– объем кислорода вступившего во взаимодействие с расплавом
$V_{MO_2}$	– молярный объем кислорода
$V'_{MO_2}$	– молярный объем кислорода при нормальных условиях
$p'$	– нормальное давление
$T'$	– нормальная температура
$\rho_{Al_2O_3}$	– плотность оксида алюминия
$\psi$	– доля твердой фазы
$\psi_E$	– доля эвтектики в расплаве
$c_1$	– удельная теплоемкость перегретого расплава
$c_2$	– удельная теплоемкость расплава в твердожидком состоянии
$\lambda_1$	– коэффициент теплопроводности перегретого расплава
$\lambda_2$	– коэффициент теплопроводности расплава в твердожидком состоянии
$S_{ЭФ}$	– эффективная удельная теплота кристаллизации
$(v_{max})_H$	– максимальное значение скорости на носике потока расплава
$T_H$	– температура на носике потока расплава
$l$	– текущая длина заполненного канала пробы на жидкотекучесть
$\tau_{сop}$	– предельное напряжение сдвига $\tau_s$ при температуре $T_{оп}$
$(F_{SR})_{min}$	– минимально возможная площадь свободной поверхности расплава
$\alpha$	– угол наклона контрольного участка пробы Шарова–Галдина
$F_{ст}$	– площадь поперечного сечения стояка
$F_k$	– площадь поперечного сечения коллектора
$F_{пит}$	– площадь поперечного сечения питателя
$v_y$	– скорость восходящих потоков
$v_{пит}$	– скорость расплава в питателе
$d_{отв}$	– диаметр выпускного отверстия литниковой чаши
$V_{AL_2O_3}$	– объем оксидов, образующихся из $1 \text{ см}^3$ воздуха содержащегося в форме
$V_\phi$	– объем рабочей полости формы
$V_o$	– объем отливки
$M_p$	– массовый расход

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Труды XII Съезда литейщиков России, 7-11 сентября 2015 г. / Российская ассоц. Литейщиков, Правительство Нижегородской обл. – Нижний Новгород : Нижегородский гос. Технический ун-т, 2015. – 519 с.
2. Труды XIII Съезда литейщиков России, 18-22 сентября 2017 г. / Российская ассоциация литейщиков, Правительство Нижегородской области. – Челябинск : Изд. Центр ЮурГУ, 2017. – 437 с.
3. Бобрышев Б.Л. Ресурсо- и энергосбережение при литье крупногабаритных отливок из магниевых сплавов/ Б.Л. Бобрышев, Д.В. Попков, В.С. Моисеев, О.В. Кошелев, Д.Б. Бобрышев, К.В. Моисеев// Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». –2020.–№1.– С. 77-86.
4. Вагин Г.Я. Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве: учебник для вузов / Г.Я. Вагин, В.А. Коровин, И.О. Леушин, А.Б. Лоскутов. –М.: ФОРУМ, 2012. - 271с.
5. Муравьев В.И. Ресурсосбережение при применении фасонных отливок в конструкции самолетов / В.И. Муравьев, В.И. Меркулов, Б.Н. Марьин // Литейное производство. –1999. –№ 12. – С. 13 –14.
6. Муравьев В.И. Изготовление литых заготовок в авиастроении / В.И. Муравьев, В.И. Якимов, Ри Хосен и др. –Владивосток: Дальнаука, 2003. –616 с.
7. Дибров И.А. Качественное литье - прогресс машиностроения// Литейщик России. –2017. –№ 8. –С. 18–27.
8. Дибров И.А. Рекомендации XIII съезда литейщиков по развитию литейного производства и литейного машиностроения России// Литейщик России. –2018. –№ 5. –С. 11–16.
9. Дибров И.А. Литейное производство - прогресс машиностроения// Литейщик России. –2019. –№ 8. –С. 13–24.
10. Дибров И.А. Вклад общественных организаций литейщиков в развитие литейного производства России и СССР 1866-2015 годы // Литейщик России.–2015.– №8.

11. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Состояние и перспективы развития мирового рынка металлоотливок // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка.– 2018.– №3. –С. 66–70.
12. Буданов Е.Н. Импортозамещение отливок//Литейщик России.–2018.–№3.–С. 5–12.
13. Альтман М.Б. Андреев А.Д., Балахонцев Г.А. и др. Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справ. изд./ Под ред. В.И. Добаткина. – М. : Metallurgy, 1983. –351 с.
14. Садоха М.А., Волочко А.Т. Рафинирование алюминиевых сплавов инертными газами // Литье и металлургия. –2012. –№ 3. –С. 69–71.
15. Курилина Т.Д. Особенности рафинирования металлических расплавов в форме // Литейное производство.– 2016.– №11. –С. 13–15.
16. Леушин И.О. Пути повышения эффективности рафинирования алюминиевых сплавов / И.О. Леушин, Э.Е.Филиппов, Р.М. Янбаев и др. // Литейное производство. –2003. –№ 11. –С. 4–5.
17. Питка С.А., Марков В.В. Повышение эффективности рафинирования сплавов фильтрованием // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 1. –С. 5 – 7.
18. Аристова Н.А., Колобнев И.Ф. Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов. –М. : Metallurgy, 1977. –144 с.
19. Bozchaloei G. E., et al. Effect of oxide bifilms on the mechanical properties of cast Al–7Si–0.3Mg alloy and the roll of runner height after filter on their formation. *Materials Science and Engineering: A.*, 2012, vol. 548(0), pp. 99–105.
20. Dai X., Yang X., Campbell J., Wood J. Effects of runner system design on the mechanical strength of Al–7Si–Mg alloy castings. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. 10, pp. 315–325.
21. Милицин К. Н. Влияние состава и температурной обработки металлических расплавов на питание отливок// Литейное производство.– 1960.– №3. –С. 19–24.

22. Василенко З.А. Влияние положения в форме литых испытательных образцов на механические свойства алюминиевых сплавов / З.А. Василенко, Г.Г. Крушенко, Б.А. Балашов, А.Н. Тимофеев // Проблемы прочности. –1992. –№ 1. –С. 80–82.
23. Колобнев И.Ф. Справочник литейщика. Цветное литье из легких сплавов / И.Ф. Колобнев, В.В. Крымов, А.В. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1974. – 415 с.
24. Крушенко Г.Г., Василенко З.А. Плотность и механические свойства силицидов, термически обработанных в жидком состоянии // Расплавы. –1988. –Т. 2. – Вып. 6. –С. 67–69.
25. Курдюмов А.В., Куманин И.Б., Алексеев Л.А. Влияние окислов на структуру и свойства сплава АЛ4// Литейное производство.– 1969.– №8. –С. 20–21: ил.
26. Галдин Н.М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов / Н.М. Галдин. – М. : Машиностроение, 1978. - 195с.
27. Швидковский Е.Г. Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов : [монография] / – М. : Гос. изд-во техн. –теорет. лит., 1955. – 206 с.
28. Альтман М.Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. –М. : Metallургия, 1965. –126 с.
29. ГОСТ 1583-93 Сплавы Алюминиевые литейные. Технические условия. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. –67 с.
30. Батышев К.А. Уплотнение и упрочнение отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство.–2020.–№5.–С. 32-34.
31. Семенченко А.И. Низкотемпературное литье алюминиевых сплавов/ А.И. Семенченко, В.М. Дука, И.В. Хвостенко, Г.П. Борисов, А.Г. Вернидуб // Процессы литья.–2013.–№4.–С. 47–55
32. Алексеев Л.А., Куманин И.Б., Курдюмов А.В. //Изв. Вузов. Цветная металлургия. – 1968. – № 1. –С. 153 – 159: ил.

33. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2 ч. Ч. 2. Формирование макроскопического строения отливки. Учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности Машины и технология литейного производства. – М. : Машиностроение, 1979. – 335 с.: ил.
34. Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 360 с.
35. Васенин В.И. Экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений литниковой системы // Литейное производство.– 2009.– №1. –С. 22–25.
36. Вейник А.И. Литье в кокиль / С.Л. Бураков, А.И. Вейник , Н. П. Дубинин , и др. ; под ред. А.И. Вейника - М. : Машиностроение, 1980. - 415 с.
37. Галдин Н.М. Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок / Н.М. Галдин, В.В. Чистяков, А.А. Шатульский/ под общ. ред. В.В. Чистякова. – М.: Машиностроение, 1992. – 256с.
38. Кокильное литье: Справочное пособие. – М. :Машиностроение, 1967.–459 с.
39. Рабинович Б. В. Введение в литейную гидравлику / Б. В. Рабинович.–М. : Машиностроение, 1966. – 422 с.
40. Цветное литье. Справочник /Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; под общ. ред. Н.М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.
41. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: Учеб./ под ред. Э.Б. Гофмана. – Екатеринбург: Изд-во РГПШУ, 2006. –454 с.
42. Шаров М.В., Галдин Н.М. Влияние турбулентности потока на образование загрязненности в алюминиевых сплавах// Литейное производство. – 1971. – №1. – С. 9–13.
43. Campbell J. *The New Metallurgy of Cast Metals: Casting, 2<sup>nd</sup> Edition*. Butterworth-Heinemann, 2003. 337 p.
44. Dispinar D. *Determination of the melt quality of aluminum and its alloys, PhD*, University of Birmingham, UK, 2005. 116 p.
45. El-Sayed M. A., *Double Oxide Film Defects and Mechanical Properties in Aluminium Alloys, PhD thesis*, Birmingham, UK, 2012

45. Lai N.W., Griffiths W. D., Campbell J., Modelling of the potential for oxide film entrainment in light metal alloy castings. *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes- X (Destin, May 25-30, 2003)*, Destin, FL, 2003, pp. 415–422.
46. Коротченко А.Ю. Новый критерий образования усадочной пористости в отливках // *Заготовительные производства в машиностроении*. –2011. –№ 9. –С. 3-7.
47. Коротченко А.Ю., Смыков А.Ф., Ларичев Н.С. Новый метод единства реологических моделей для решения задач по технологии литья// *Литейное производство*. –2015. –№ 3. –С. 12-16.
48. Ларичев Н.С., Коротченко А.Ю., Куца А.Ю. Оценка влияния затрудненной усадки на образование пористости в отливках // *Литейное производство*. – 2016. – № 7. –С. 10–15.
49. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Методология автоматизированного проектирования литниково-питающих систем// *Литейное производство*. – 1992. – №12. –С. 5–9.
50. Моисеев К.В., Смыков А.Ф., Бережной Д.В., Бобрышев Б.Л. Методика проектирования технологических процессов литья легких сплавов в комбинированную форму// *Литейщик России*. – 2011. – №12. –С. 33–35.
51. Смыков А.Ф., Моисеев В.С. Методика расчета заполнения форм расплавом для гравитационных методов литья // *Технология легких сплавов*. – 2015. №3. –С. 112–116.
52. Чистяков В.В. Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. – М.: Машиностроение, 1990. –224с.
53. Шатульский А.А. Разработка методов расчета процессов заполнения полости форм расплавом / А.А. Шатульский, В.А. Изотов, Т.А. Курочкина // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2003. – №6. – С. 7–10.
54. Шатульский А.А. Моделирование процесса заполнения формы расплавом / А.А. Шатульский, В.А. Изотов, А.А. Акутин, А.С. Равочкин, Ю.В. Чибирнова // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2007. – №8. – С. 11–17.

55. Шатульский А.А. Исследование процесса заполнения формы протяженных тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов дождевой литниковой системой / А.А. Шатульский, В.А. Изотов, Р.В. Барабанов, А. А. Акутин // Вестник РГАТА им. П. А. Соловьева. –2010. –№1 (16). –С. 107–115.
56. Познышев С.Л. Анализ проекта освоения серийного производства габаритных герметичных алюминиевых отливок / С.Л. Познышев, Н.М. Джафаров, С.В. Богушевич, Н.А. Белов и др. // Литейщик России. –2014. –№ 10. –С. 12–17.
57. Добаткин В.И. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / В.И. Добаткин, Р.М. Габидуллин, Б.А. Колачев, Г.С. Макаров. –М. : Металлургия, 1976. –264 с.
58. Green N., Campbell J. Influence of oxide film filling defects on the strength of Al-7Si-Mg alloy castings. *AFS Transactions*, 1994, vol. 102, pp. 341–347.
59. Ludwig T.H., et al., Influence of oxide additions on the porosity development and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings. *International Journal of Metalcasting*, 2012, (6), pp. 41-50.
60. Курдюмов А.В. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов / А.В. Курдюмов, С.В. Инкин, В.С. Чулков, Н.И. Графас. – М. : Металлургия, 1980. – 195с.
61. Крушенко Г.Г. Предотвращение образования и блокирование отрицательного воздействия пористости на свойства отливок из алюминиевых сплавов // Вестник СибГАУ. –2012.– Вып. 3 (43). С. 224-226.
62. Крушенко Г.Г. Предупреждение образования пористости в алюминиевых отливках двигателей летательных аппаратов. Динамика систем, механизмов и машин // Динамика систем, механизмов и машин. –2012.– №2.– С.150-152.
63. Мальцев В. П. Исследование литниковых систем для заливки алюминиевых сплавов в кокиль: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00./ Мальцев Владимир Петрович. – М., 1970. – 203с. :ил.
64. Мешков В. П. Конструкции литниковых чаш и воронок для форм с вертикальным разъемом//Литейное производство.–1998.–№2-3.–С. 10–12.

65. Мусияченко А.С., Соловьев Е.П., Кошкин В.В. Исследование режимов заполнения формы на прозрачной модели// Литейное производство.–1987.–№1.– С. 12–14.
66. Поликовский В.И. Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью / В.И. Поликовский, Р.Г. Перельман. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 190 с.
67. Gadalla M., Habingreither R., Cook R. Effect of Filling Time and Gating System Design Parameters Selection on Mold Filling Properties . *TMS*, 2007, pp. 39-45.
68. Ingle P. D., Narkhede B. E., A Literature Survey Of Methods To Study and Analyze The Gating System Design for Its Effect on Casting Quality. *Materials Today: Proceedings*, 5 (2), 2018, pp : 5421-5429.
69. Masoumi M., Hu H., Hedjazi J., Boutorabi M.A. Effect of Gating Design on Mold Filling. *AFS Transactions*, 2005, Vol.152, No.2, pp.1-12.
70. Yue Y., Green N.R. Modelling of different entrainment mechanisms and their influences on the mechanical reliability of Al-Si castings. *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes- XIII (Schladming, June 17-22, 2012)*, Schladming, Austria, 2012.
71. Schmitz C., *Hand book of Aluminium Recycling*, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2006
72. Шаров М.В. Теоретические основы литейного производства: конспект лекций. –2-е изд., с изм. и доп. – М.: ВИАМ, 2016.–480с.: ил.
73. Кузьмичев Л. В., Малиновский Р. Р. Технология легких сплавов.– М. ВИЛС, 1973, №3, с. 26-28.
74. Чернега Д.Ф. Газы в цветных металлах и сплавах/ Д.Ф. Чернега, О.М. Бялик, Д.Ф. Иванчук, Г.А. Ремизов. – М. : Металлургия, 1982. – 176 с.: ил.; 22 см.
75. Wightman. G., Fray D. J. The dynamic oxidation of aluminium and its alloys *Metallurgical transactions B*, 1983, vol. 14B(December), pp. 625-631
76. Nayebi B., Divandari M. Characteristics of dynamically formed oxide films on molten aluminium. *International Journal of Cast Metals Research*, 2012, vol. 25, no 5, pp. 270-276

77. Campbell J. An overview of the effects of bifilms on the structure and properties of cast alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2006, vol. 37(December) , Issue 6, pp 857–863.
78. Кимстач Г.М. О закономерностях распределения неметаллических примесей в алюминиевых расплавах// *Литейное производство.*– 1977.– №6. –С. 5–6.
79. Дубицкий Г.М. Литниковые системы / Г.М. Дубицкий. – М., Свердловск: Машгиз, 1962. –255 с.
80. А.с. 1018778 СССР, МПК<sup>7</sup> В 22 С 009/08. Литниковая система / Н. М. Галдин (СССР). – № 3392239/22–02; заявл. 02.02.82; опубл. 23.05.83, Бюл. № 19. – 3 с.
81. А.с. 1294456 СССР, МПК<sup>7</sup> В 22С009/08. Литниковая система / П.А. Опачич, Н.В. Володик, В.В. Никитин, Н.В. Шестаков, М.В. Тимров, Л.Ф. Маляревская (СССР). – № 3900831/22–02; заявл. 20.03.85; опубл. 07.03.87, Бюл. № 9. – 3 с.
82. Jacobs M.J. Filters: the hows & whys. (Casting facts). *Modern Casting*. May 2003. American Foundry Society Inc.
83. Чистяков В.В., Воздвиженский В.М. Расчет критической скорости заполнения формы // *Литейное производство.*–1971.–№3.–С. 9–11.
84. Моисеев К. В. Разработка методического обеспечения проектирования литниково-питающих систем для крупногабаритных отливок из легких сплавов : дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04 / Моисеев Кирилл Викторович. – М., 2012. – 180 с. :ил.
85. Chang Q., Schwam D., Chen C., Xiong J., Wallace J. F. Mold Filling Process Control of Molten Aluminum in Permanent Molds with a Web Gating System. *Materials Science Forum*, 2008, Vols. 575-578, pp. 63-68
86. Кисиленко Л.Е., Бычков Б.В., Фуфаев В.Э. Совершенствование технологии литья поршней с упрочняющей вставкой// *Заготовительные производства в машиностроении.*– 2010.– №3. –С. 4–8.
87. Краев Б.А. Технология и оборудование для литья поршней/ Б.А. Краев, М.А. Садоха, А.П. Мельников и др.//*Литье и металлургия.* –2001. –№ 4. –С. 52–54.

88. Садоха М.А. Определение технологических параметров производства отливок поршней высоконагруженных дизельных двигателей // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 3. – С. 61–64.
89. Храмов В.Д., Мишаков Е.В. Литье крупногабаритных тонкостенных деталей методом направленно-последовательной кристаллизации // *Вопросы технологии литейного производства. Труды МАТИ*. – Вып. 49. – М.: Оборонгиз. – с. 5-23.
90. Артамонова Ю.С. Возможность использования дождевой литниковой системы для заливки форм сплавами на основе алюминия /Ю.С. Артамонова, В.А. Изотов, А.А. Акутин, Р.В. Барабанов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2012. – № 2, – С. 3 – 5.
91. Федулова Ю.С., Изотов В.А., Акутин А.А. Комплексный подход к решению проблемы получения отливок из алюминиевых сплавов с применением дождевой литниковой системы // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2015. – № 1. – С. 3 – 8 .
92. Reilly C., Green N. R., Jolly M. R. The present state of modeling entrainment defects in the shape casting process, *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37 pp. 611–628
93. Yang Y. *Modelling of the effects of entrainment defects on mechanical properties in Al-Si-Mg alloy castings*, PhD, University of Birmingham, UK, 2014. P. 328
94. Альтман М.Б., Лебедев А.А., Чухров М.В. Плавка и литье легких сплавов. – М. : Металлургия, 1969. – 680 с.
95. Zhang F. et al. Modeling of the viscosity in the AL–Cu–Mg–Si system: Database construction. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 2015 (49), pp. 79–86.
96. Баландин Г.Ф., Каширцев Л.П. Реологическое исследование трещиностойчивости отливок во время их затвердевания // *Литейное производство*. – 1978. – №1. – С. 5–8.
97. Jones W.R.D., Bartlett W.L., The Viscosity of Aluminium and Binary Aluminium Alloys. *J. Inst. Metals*, 1952. 81(11), pp. 145-152

98. Каширцев Л.П. Реологическое исследование поведения сплавов в интервале их кристаллизации (на примере жидкотекучести и горячеломкости сплавов системы алюминий-кремний) : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Каширцев Леонид Петрович. – М., 1977. –252с. :ил.
99. Луковников Д.А. Разработка и реализация численных моделей для технологического анализа сопряженных гидродинамических и тепловых процессов при заполнении литейной формы : дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04./ Луковников Дмитрий Александрович.– СПб., 2003. – 178 с.: ил.
100. Мусияченко А. С. Предельно допустимые скорости течения расплава в форме// Литейное производство.– 1987.– №2. –С. 16–17.
101. Barkhudarov M.R., Hirt C.W. Tracking defects. *Technical report, Flow Science, Inc.*, 1999.
102. Dai X., Jolly M., Yang X., Campbell J. Modelling of Liquid Metal Flow and Oxide Film Defects in Filling of Aluminum Alloy Castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2012, vol. 33, pp. 1–10.
103. Reilly C., Green N. R., Jolly M. R., Gebelin J. C. Using the Calculated Fr Number for Quality Assessment of Casting Filling Methods, *Modelling of casting, welding and advanced solidification process XII (Vancouver, June7-14, 2009)*, Vancouver, Canada,2009, pp. 419-426
104. Yang X., Huang X., Dia X., Campbel, J., Tatler J. Numerical Modelling of Entrainment of Oxide Film Defects in Filling of Aluminium Alloy Castings. *Int. J. Cast Met. Res.*, 2004, vol. 17, pp. 321–331.
105. Kendall M. G., and Moran P. A. P. *Geometrical Probability*. London, Griffin, 1963. 125 p.
106. Зарубин А.М. Об оценке балла пористости отливок // Литейное производство. –1985. –№ 4. –С. 15-16.
107. Zarubina O.A., Korotchenko A.Yu., Zarubin A.M. Assessment of Mold Filling Rate Influence on Amount of Oxide Films in Castings by Numerical Simulation. *Materials Science Forum*, 2020. – Vol. 989 MSF. – P. 595-599

108. Химия : учебник для вузов / А.А. Гуров , Ф.З. Бадаев , Л.П. Овчаренко , В.Н. Шаповал – 2-е изд., стер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 777 с.
109. Егоров С.Г. Практическая реализация методов внешнего воздействия на металлические расплавы: монография / С.Г. Егоров, И.Ф. Червоный, Р.Н. Воляр. - Запорожье: ЗГИА, 2012. –222 с.
110. Данков П.Д. Электронографические исследования окисных и гидроокисных пленок на металлах / П.Д. Данков, Д.В. Игнатов, Н.А. Шишаков ; Акад. наук СССР. Ин-т физ. химии. –М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1953. –200 с.
111. ГОСТ 16438-70 Форма песчаная и металлическая для получения проб жидкотекучести металлов.–М.: ИПК Издательство стандартов, 1999.–28с.
112. Колтыгин А.В., Плисецкая И.В. Влияние малых добавок кальция на жидкотекучесть магниевых сплавов// Литейщик России.– 2011.– №6. –С. 41–43.
113. Лущик П.Е., Рафальский И.В. Расчет двухфазной зоны в интервале кристаллизации алюминиевых сплавов с использованием термического анализа// Литье и металлургия. –2012. –№ 1. –С. 79–83.
114. Лущик П.Е. Термосенсорная диагностика процесса затвердевания сплава АК9ч при разработке технологии получения бездефектных отливок// Литье и металлургия. –2012. –№ 3. –С. 281–285.
115. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливки. М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
116. Специальные способы литья: Справочник/В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др.; под общ. ред. В. А. Ефимова. –М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.: ил.
117. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М. : Машиностроение, 1975. – 559с.
118. Зарубина О.А., Зарубин А.М. Управление содержанием и распределением оксидных включений в кокильных отливках из алюминиевых сплавов// Заготовительные производства в машиностроении.– 2020. – Т. 18. –№ 1. –С. 3 – 6.

119. Зарубина О.А., Зарубин А.М. Прогнозирование содержания оксидов и пористости в отливках из алюминиевых сплавов// Заготовительные производства в машиностроении .–2020. – Т. 18.– № 5. –С. 195 – 198.
120. ОСТ23.4.50-73 Отливки из алюминиевых сплавов. Технические требования.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Акт об использовании**

JSC «Electrosetstroyproject»  
 Russia, 127566, Moscow  
 1, building 36, Vysokovoltny proezd  
 phone: +7 (495) 234 71 20  
 fax: +7 (495) 727 43 71  
 info@essp.ru, www.essp.ru



АО «Электросетьстройпроект»  
 Россия, 127566, г. Москва,  
 Высоковольтный проезд, дом 1, стр. 36  
 телефон: +7 (495) 234 71 20  
 факс: +7 (495) 727 43 71  
 info@essp.ru, www.essp.ru

Исх. № 510Т-20 от «19» ноября 2020 г.  
 Вход. № от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ**

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Зарубиной Ольги Александровны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 - "Литейное производство", были использованы в деятельности АО «Электросетьстройпроект».

К числу таких результатов относятся:

- методика расчета на ЭВМ литниковых систем для отливок из алюминиевых сплавов с повышенными требованиями по механическим свойствам типа "Корпус", "Рама" и "Распорка" массой от 0,2 до 1,5 кг при литье в кокиль;
- методика проектирования кокилей, способствующих направленному затвердеванию отливок с разнесенными тепловыми узлами.

Использование указанных результатов позволило сократить сроки доводки техпроцесса изготовления отливок и обеспечить их служебные свойства при повышении коэффициента использования металла в 1,5...3,3 раза.

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

Технический директор  
 АО «Электросетьстройпроект»

Д.А. Винников



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б****Акт приема-передачи документации**

Приложение № 1  
к Договору на выполнение  
работ № 1-318/6  
от 29 марта 2018 г.

**Акт приема-передачи документации №2.**

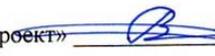
г. Москва

«28» МАЯ 2018 г.

АО «Электросетьстройпроект», именуемое в дальнейшем «Заказчик», в лице Генерального директора Тищенко Андрея Викторовича, действующего на основании Устава, с одной стороны, и гражданка Российской Федерации Зарубина Ольга Александровна, именуемая в дальнейшем «Исполнитель», паспорт серия 46 07 960989, выдан Видновским ОВД Ленинского района Московской обл. 10.01.2008, проживающая по адресу: г. Видное-2, Петровский пр-д, д. 24, кв. 7, с другой стороны, совместно именуемые «Стороны», а по отдельности «Сторона», заключили настоящий Акт о нижеследующем:

1. В соответствии с п. 2.2 Договора на выполнение работ № 1-318/6 от 29 марта 2018 г. (далее – Договор) Исполнитель передал, а Заказчик принял следующую документацию:
  - конструкторскую документацию необходимую для изготовления кокиля детали «Корпус 3»;
  - описание технологического процесса получения деталей «Корпус 3».
2. По качеству разработанной документации Заказчик претензий не имеет. Документация выполнена в срок и в полном объеме.
3. Фактическое качество разработанной документации соответствует требованиям Договора.
4. Настоящий Акт составлен в 2 (двух) экземплярах, по одному для каждой из Сторон.

Документацию принял и проверил:

Главный технолог АО «Электросетьстройпроект»  Д.А. Винников.

**Заказчик:**

АО «Электросетьстройпроект»  
Генеральный директор

 А.В. Тищенко

**Исполнитель:**

Зарубина Ольга Александровна

 О.А. Зарубина

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акт выполненных работ

Акт выполненных работ  
к Договору №1-318/6 от «29» марта 2018 г.

г. Москва

«26» ноября 2018 г.

АО «Электросетьстройпроект», именуемое в дальнейшем «Заказчик», в лице Генерального директора Тищенко Андрея Викторовича, действующего на основании Устава, с одной стороны, и гражданка Российской Федерации Зарубина Ольга Александровна, именуемая в дальнейшем «Исполнитель», паспорт серия 46 07 960989, выдан Видновским ОВД Ленинского района Московской обл. 10.01.2008, проживающая по адресу: г. Видное-2, Петровский пр-д, д. 24, кв. 7, с другой стороны, совместно именуемые «Стороны», а по отдельности «Сторона», заключили настоящий Акт о нижеследующем:

1. Во исполнение Договора на выполнение работ № 1-318/6 от «29» марта 2018 г. (далее – Договор) Исполнитель выполнил по заданию Заказчика следующие работы:
  - разработал конструкторскую документацию и 3Д модель отливки «Корпус 3»;
  - осуществил проектирование кокиля для станка 11 Л.5 00.00.00;
  - написал технологический процесс изготовления отливки «Корпус 3»,
 а по технологическому процессу получены годные отливки детали «Корпус 3» (Протокол испытаний № 7812 от 23 ноября 2018 г. Испытательная лаборатория ЗАО «НТЦ» Электросети, аккредитованная в области испытаний линейной арматуры).
2. По качеству выполненных работ Заказчик претензий не имеет. Работы выполнены в срок и в полном объеме.
3. Фактическое качество выполненных работ соответствует требованиям Договора.
4. Настоящий Акт составлен в 2 (двух) экземплярах, по одному для каждой из Сторон.

**Заказчик:**  
АО «Электросетьстройпроект»  
Генеральный директор  
\_\_\_\_\_ А.В. Тищенко  
М.П.



**Исполнитель:**  
Зарубина Ольга Александровна  
\_\_\_\_\_ О.А. Зарубина